

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Edile
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

HBIM e GIS 3D per la gestione del patrimonio architettonico: il caso del Sacro Monte di Varallo



Relatore

Prof. Andrea Maria Lingua

Correlatori

Arch. Francesca Matrone
Prof. Marco Zerbinatti

Candidata

Isabella Palazzo

Luglio 2020

Indice

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
1 PATRIMONIO CULTURALE: RISORSA DA VALORIZZARE E TRASMETTERE	4
1.1 PROGETTO MAIN10ANCE	5
1.1.1 Tecnologie e strumenti.....	6
1.1.2 Presupposti per un <i>database</i> interoperabile e multi-scala: analisi degli <i>Standard</i>	7
1.1.3 Progettazione di un <i>database</i>	12
Modello concettuale di Main10ance.....	13
Modello logico di Main10ance	14
2 I SACRI MONTI DI PIEMONTE E LOMBARDIA	17
2.1 IL SACRO MONTE DI VARALLO SESIA	21
2.1.1 La storia	25
2.1.2 Manutenzione e conservazione	30
2.1.3 Cappella 17- La Trasfigurazione di Gesù sul Monte Tabor	32
3 IL RILIEVO DEL PATRIMONIO CULTURALE	36
3.1 TECNICHE DI RILEVAMENTO.....	38
3.1.1 Il rilievo topografico	38
L’acquisizione dei dati tramite rilievo topografico al Sacro Monte di Varallo	41
3.1.2 Il rilievo tramite tecnica LIDAR.....	46
L’acquisizione dei dati tramite tecnica LIDAR al Sacro Monte di Varallo	51
3.1.3 Rilievo fotogrammetrico	53
Acquisizione dei dati tramite UAV al Sacro Monte di Varallo.....	56
4 ELABORAZIONE DEI DATI	61
4.1 ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI DAL RILIEVO TOPOGRAFICO	61
4.2 ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI CON <i>LASER SCANNER</i>	64
4.2.1 Il <i>software Faro Scene</i>	64
4.2.2 Importazione delle scansioni in <i>Faro Scene</i>	64
4.2.3 Divisione ed estrazione delle scansioni “ <i>Tribu</i> ”	65
4.2.4 Collocazione delle scansioni.....	67
Collocazione delle scansioni per forma	68
Registrazione dei marker	69

Collocazione delle scansioni basata sui target	70
4.2.5 Risultati scansione e Tensione dei <i>Target</i>	71
4.2.6 Colorazione delle scansioni ed esportazione delle nuvole di punti	73
4.2.7 Il <i>software CloudCompare</i>	75
4.2.8 Pulizia e Unione delle nuvole di punti	75
4.2.9 Filtraggio.....	78
4.3 ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI TRAMITE TECNICA FOTOGRAMMETRICA	80
4.4 NUVOLA <i>LASER SCANNER</i> E NUVOLA FOTOGRAMMETRICA A CONFRONTO	81
4.4.1 <i>Cloud to cloud Distance</i>	85
Muro perimetrale cappella 17	87
Lanterna cappella 17.....	88
4.4.2 Confronto della densità	88
4.5 PREPARAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI PER LA MODELLAZIONE	91
4.5.1 Taglio e unione delle nuvole da <i>laser scanner</i> e da fotogrammetria.....	91
4.5.2 Suddivisione della nuvola di punti in sottoregioni.....	92
4.5.3 Esportazione delle sottoregioni della nuvola di punti	93
Il <i>software Autodesk ReCap Pro</i>	93
Importazione ed esportazione tramite <i>ReCap Pro</i>	93
5 LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE	95
5.1 LA METODOLOGIA BIM.....	95
5.2 LA METODOLOGIA HBIM	98
5.2.1 Modellazione della Cappella 17 con <i>Autodesk Revit</i>	99
Il <i>software Autodesk Revit</i>	100
5.2.2 Modello federato esistente e importazione della nuvola di punti.....	101
5.2.3 Le famiglie di sistema nel modello	103
5.2.4 Le famiglie locali nel modello	106
5.2.5 Le famiglie caricabili nel modello	109
5.2.6 Modellazione della volta.....	112
5.2.7 Scostamento del modello BIM dalla nuvola di punti	113
5.2.8 Modellazione dell'unità volumetrica costituente la Cappella 17	117
5.2.9 Inserimento del modello della cappella 17 nel modello federato esistente del Sacro Monte di Varallo.....	117
6 IL NUOVO MODELLO FEDERATO	119
6.1 REALIZZAZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO	119
6.1.1 Realizzazione del modello digitale del terreno tramite <i>CloudCompare</i>	120
6.1.2 Realizzazione del modello digitale del terreno tramite <i>3DReshaper</i>	122
Il <i>Software 3DReshaper</i>	122
Realizzazione del modello digitale del terreno conclusivo	122

6.2	INSERIMENTO DEL DTM E DELLA CAPPELLA 17 NEL NUOVO MODELLO FEDERATO DEL SACRO MONTE DI VARALLO.....	124
7	L'INTEROPERABILITÀ	128
7.1	GIS	128
7.1.1	Il <i>software ArcGIS</i>	129
7.2	INTEROPERABILITÀ DBMS-HBIM E DBMS-GIS	130
7.2.1	Test di interoperabilità tra i <i>software Revit e PostgreSQL</i>	132
	Struttura del <i>database</i> generato in ambiente BIM e creazione dei parametri condivisi	135
7.2.2	Test di interoperabilità tra i <i>software Revit e Microsoft SQL Server</i>	137
7.2.3	Test di interoperabilità tra i <i>software Revit e Microsoft Access</i>	140
7.2.4	Test di interoperabilità tra i <i>software Microsoft SQL Server e ArcGIS Desktop</i>	142
7.2.5	Test di interoperabilità tra i <i>software Microsoft Access e ArcGIS Desktop</i>	145
7.3	IMPLEMENTAZIONE DEL <i>DATABASE</i> DI MAIN10ANCE.....	146
7.4	VISUALIZZAZIONE DEL PROGETTO MAIN10ANCE SU <i>ARCGIS DESKTOP</i>	152
7.4.1	Visualizzazione dei dati spaziali della Cappella 17 su <i>ArcGIS Desktop</i>	154
7.4.2	Visualizzazione dei dati alfanumerici della Cappella 17 su <i>ArcGIS Desktop</i>	159
	CONCLUSIONI	165
	BIBLIOGRAFIA	168
	ARTICOLI.....	169
	SITOGRAFIA.....	170
	TESI.....	171
	ALLEGATI.....	171

Indice delle figure

Figura 1 - Progetto Main10ance.....	5
Figura 2 - Schema riassuntivo degli strumenti operativi di supporto al progetto Main10ance.	7
Figura 3 - <i>Standard</i> nazionali e internazionali di mappatura.	8
Figura 4 - Livelli di dettaglio previsti in CityGML.....	9
Figura 5 - LoD 0-4 di CityGML con i loro requisiti di precisione.....	9
Figura 6 - Temi INSPIRE raggruppati nei tre allegati.....	10
Figura 7 - Integrazione dei LoD di CityGML e i LOD dell'UNI11337-4:2017.	11
Figura 8 - Incremento dei LoD di CityGML.	11
Figura 9 - Processi di sviluppo del database di Main10ance.....	12
Figura 10 - Porzione del Modello Concettuale di Main10ance in cui si evidenzia l'unico legame spaziale con l'entità "LOCALITA' SIGNIFICATIVE".....	14
Figura 11 - Porzione del Modello concettuale in cui sono evidenziate alcune operazioni di ristrutturazione.....	14
Figura 12 - Esempio di entità rappresentate mediante relazioni. Sono evidenti la sigla dei nomi e la tipologia di dato associati a ciascun attributo.	15
Figura 13 - Porzione del Modello logico del database di Main10ance in cui sono evidenti: chiavi primarie, chiavi esterne e cardinalità delle associazioni.....	16
Figura 14 - Localizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia.	17
Figura 15 - Sacro Monte di Varese.....	18
Figura 16 - Cappella XI, Sacro Monte d'Orta.	19
Figura 17 - Statua di San Francesco d'Assisi appartenente al gruppo scultoreo della Cappella XIII del Sacro Monte d'Orta.	19
Figura 18 - Itinerari del "Devoto cammino dei Sacri Monti". Fonte:.....	20
Figura 19 - Sacri Monti siti UNESCO dal 2003.....	21
Figura 20 - Veduta del Sacro Monte di Varallo.	21
Figura 21 - Interno Cappella 33, scenografia rappresentante l'" <i>Ecce Homo</i> ", nata dalla collaborazione dei fratelli d'Enrico e del Morazzone.....	22
Figura 22 - Mappa del Sacro Monte di Varallo.....	23
Figura 23 - Complesso di Nazaret (sinistra) e Betlemme (destra).....	23
Figura 24 - Piazza dei Tribunali del Sacro Monte di Varallo.....	24
Figura 25 - Piazza della Basilica del Sacro Monte di Varallo.....	24

Figura 26 - Pianificazione iniziale del Sacro Monte di Varallo attuata da padre Bernardino Caimi.	26
Figura 27 - Progetto di Galeazzo Alessi per il Sacro Monte di Varallo.	27
Figura 28 - Apparato scultoreo e affreschi della cappella XXXVI - La salita al calvario.	28
Figura 29 - Il Paradiso della cupola della Basilica dell'Assunta.	28
Figura 30 - Facciata della Basilica dell'Assunta precedente al 1891(a sinistra) e risalente al 1956 (a destra).	29
Figura 31 - Foto aerea delle cappelle del Sacro Monte di Varallo.	30
Figura 32 - Targa riconoscimento UNESCO per il Sacro Monte di Varallo, 4 luglio 2003.	30
Figura 33 - Coperture con <i>beole</i> del Sacro Monte di Varallo.	32
Figura 34 - Vista aerea della Cappella 17.	32
Figura 35 - Primo (sinistra) e secondo (destra) progetto di Galeazzo Alessi contenuti nel Libro dei Misteri. Fonte: ALESSI, G., <i>Libro dei Misteri</i> , Arnoldo Forni Editore, Bologna, 1974.	33
Figura 36 - Interno della cappella 17.	34
Figura 37 - Schema tecniche di rilievo d'interesse.	38
Figura 38 - Esempio di uno schema di copertura di un'area da rilevare. Sono visibili: vertici della rete di inquadramento (punti di dimensione maggiore), vertici della rete di raffittimento (punti di dimensione inferiore) e rete di dettaglio (linee sottili tratteggiate).	39
Figura 39 - Messa in stazione del ricevitore GPS/GNSS.	41
Figura 40 - Stazione totale Leica Nova Scan Station.	42
Figura 41 - Marker sulle superfici murarie e a terra.	43
Figura 42 - Schema della modalità di rilievo RTK rover (Sinistra). Rover e base GeoMax Zenith35 Series (Destra).	44
Figura 43 - Esempio di eidotipi realizzati.	45
Figura 44 - Esempio di monografie dei vertici realizzate.	45
Figura 45 - Schema di funzionamento dei <i>laser scanner</i>	46
Figura 46 - Schema di principio di un laser scanner a triangolazione ottica.	47
Figura 47 - Schema di principio di un <i>laser scanner</i> a comparazione di fase.	47
Figura 48 - Schema di principio di un <i>laser scanner</i> a misura del tempo di volo (TOF).	48
Figura 49 - Maglia regolare di punti generata dagli impulsi <i>laser</i>	48

Figura 50 - Schema di funzionamento di specchi poligonali rotanti (a) e di un singolo specchio oscillante (b).	49
Figura 51 - Variazione della maglia di punti in funzione della distanza.	49
Figura 52 - Esempi di mancanza e falsificazione di dati.	50
Figura 53 - schemi modello di posizionamento del laser scanner.	50
Figura 54 - <i>Laser scanner</i> FARO CAM 2.	51
Figura 55 - <i>Display</i> dello strumento per il settaggio dei parametri di scansione.	52
Figura 56 - Planimetria fuori scala relativa ai punti di stazione.	53
Figura 57 - Definizione di un punto della realtà e principio di collinearità.	54
Figura 58 - Immagine digitale e matrice di <i>pixel</i>	54
Figura 59 - Schema di prese normali (Sinistra) e prese convergenti (destra).	55
Figura 60 - Esacoportero Valis DIATI PX01.	57
Figura 61 - Fotocamera SONY nex 5.	57
Figura 62 – Piano di volo nadirale ed impostazioni.	59
Figura 63 – Piano di volo nadirale ed impostazioni.	60
Figura 64 – Rete compensata relativa alla campagna di rilevamento del 2016 ed ottenuta dal <i>software StarNet</i>	62
Figura 65 - Procedura di caricamento delle scansioni nel workspace.	65
Figura 66 - Scansione caricata.	65
Figura 67 - Scansione con visibile linea di scostamento.	66
Figura 68 - Selezione di una sezione della scansione.	66
Figura 69 – Taglio e procedura di esportazione della scansione.	67
Figura 70 - Prima disposizione manuale delle scansioni in Vista corrispondenza.	68
Figura 71 - Procedura di collocazione delle scansioni per forma.	68
Figura 72 - Settaggio dei parametri.	69
Figura 73 - Procedura di registrazione dei Marker tramite approccio manuale.	69
Figura 74 - Rinominazione Marker con relativo codice identificativo.	70
Figura 75 - Impostazioni per la collocazione delle scansioni basata sui <i>Target</i>	71
Figura 76 - Risultati scansione relativi alla prima elaborazione di Piazza del Tempio.	72
Figura 77 - Risultati scansione relativi all'ultima elaborazione di Piazza del Tempio.	72
Figura 78 - Risultati scansione relativi alla prima elaborazione di Piazza del Tribunali.	72

Figura 79 - Risultati scansione relativi all'ultima elaborazione di Piazza del Tribunali.	73
Figura 80 - Vista 3D di Piazza dei Tribunali a fine processamento.	74
Figura 81 - Vista corrispondenza di Piazza dei Tribunali a fine processamento.....	74
Figura 82 - Importazione della nuvola di punti relativa a Piazza dei Tribunali in <i>CloudCompare</i>	75
Figura 83 - Gestione del parallelepipedo dell'Octree.....	77
Figura 84 - Suddivisione in sezioni adiacenti del singolo gruppo di scansioni.....	77
Figura 85 - Selezione poligonale degli elementi di disturbo in ogni sezione.	78
Figura 86 - Esempio di gruppo di scansione pulito.	78
Figura 87 - Intero progetto <i>subsampl</i> ed a 0,5 cm.	79
Figura 88 - Intero progetto <i>subsampl</i> ed a 4 cm.	80
Figura 89 - Finestra relativa alle informazioni delle nuvole di punti.	81
Figura 90 - Finestra relativa alle informazioni delle nuvole di punti.	82
Figura 91 - Nuvola fotogrammetrica (sinistra) e nuvola <i>laser scanner</i> (destra).	82
Figura 92 - Sovrapposizione nuvole fotogrammetrica e <i>laser scanner</i>	82
Figura 93 - Sezione della cappella 17 da nuvola <i>laser scanner</i>	83
Figura 94 - Sezione della cappella 17 da nuvola fotogrammetrica.	83
Figura 95 - Sezione di muro perimetrale e lanterna della cappella 17 da nuvola fotogrammetrica.	84
Figura 96 - Sezione di muro perimetrale e lanterna della cappella 17 da nuvola <i>laser scanner</i>	84
Figura 97 - Comando <i>Cloud/Cloud Distance</i>	85
Figura 98 - Impostazioni della sezione "Muro Perimetrale da Laser Scanner" come riferimento del confronto.....	85
Figura 99 - Impostazioni della sezione "Lanterna da Laser Scanner" come riferimento del confronto.....	86
Figura 100 - Impostazione del campo max. distance.	86
Figura 101 - Risultato analisi <i>cloud-to-cloud: Distance</i> per la sezione "Muro perimetrale".	87
Figura 102 - Mancata sovrapposizione del retro delle due nuvole a causa di assenza di punti.....	87
Figura 103 - Risultato analisi <i>cloud-to-cloud: Distance</i> per la sezione "Lanterna". ...	88
Figura 104 - Impostazione parametro raggio.	89

Figura 105 - Risultati confronto della Densità per la sezione "Lanterna" della nuvola <i>laser scanner</i>	89
Figura 106 - Confronto della Densità per la sezione "Lanterna" della nuvola fotogrammetrica.	89
Figura 107 - Confronto della Densità per la sezione "Muro Perimetrale" della nuvola <i>laser scanner</i>	90
Figura 108 - Confronto della Densità per la sezione "Muro Perimetrale" della nuvola fotogrammetrica.	90
Figura 109 - Evidenziazione della minor densità della nuvola fotogrammetrica rispetto a quella <i>laser</i>	90
Figura 110 - Taglio coperture da nuvola fotogrammetrica.	91
Figura 111 - Nuvola fotogrammetrica e <i>laser</i> unite.	92
Figura 112 - Sottoregioni Cappella 17.	92
Figura 113 - Visualizzazione delle sottoregioni della nuvola in <i>ReCap Pro</i>	93
Figura 114 - I tre significati dell'acronimo BIM.	95
Figura 115 - Rappresentazione del modello BIM come contenitore di informazioni.	96
Figura 116 - Relazione tra gli attori nella progettazione tradizionale (sinistra) e integrata (destra).	97
Figura 117 - Schematizzazione del processo di progettazione integrata.	97
Figura 118 - Schematizzazione del processo di progettazione tradizionale.	97
Figura 119 - Coordinate punto base di progetto.	101
Figura 120 - Finestra di selezione delle sottocategorie della nuvola di punti.	102
Figura 121 - Posizionamento della nuvola di punti rispetto al punto base di progetto di <i>Revit</i>	102
Figura 122 - Visualizzazione della nuvola di punti nella vista 3D.	103
Figura 123 - Visualizzazione della nuvola di punti nella vista prospettica Nord.	103
Figura 124 - Vista del profilo del muro frontale del pronao ottenuto dal calco della nuvola di punti.	104
Figura 125 - Vista planimetrica delle scale di accesso al pronao.	105
Figura 126 - Vista di sezione delle scale di accesso al pronao.	105
Figura 127 - Vista 3D della maggior parte dei componenti realizzati come famiglie di sistema.	106
Figura 128 - Vista di modifica della famiglia locale "Muro Edificio circolare".	107
Figura 129 - Vista di modifica della famiglia locale "Copertura Edificio Circolare".	107

Figura 130 - Vista di modifica della famiglia locale "Copertura Lanternino".	108
Figura 131 - Vista 3D della famiglia locale "Monte Tabor" generata per unione.	108
Figura 132 - Famiglia caricabile delle Colonne ioniche binate e relativa suddivisione in parti.	109
Figura 133 - Parametri della famiglia "Colonna + Basamento".	110
Figura 134 - Vista 3D, prospettica, di pianta con parametri e controlli di inversione della famiglia caricabile "Modiglione".	111
Figura 135 - Posizionamento dei "Modiglioni" in ambiente di progetto.	111
Figura 136 - Vista 3D delle famiglie "Archi porta" e "Cancello".	111
Figura 137 - Vista 3D della massa concettuale Volta e dei muri da superficie associati.	112
Figura 138 - Parametri della massa concettuale "Volta".	113
Figura 139 - Schema dei valori determinabili tramite As-Built: (1) centro della cella della griglia, (2) larghezza cella, (3) taglio superficie, (4) valore medio, (5) valore minimo, (6) valore massimo, (7) valore più vicino, (8) punti della nuvola di punti.	113
Figura 140 - Finestra di impostazione dei parametri di calcolo.	114
Figura 141 - Risultati analisi <i>As-built</i> sulla Parete esterna circolare.	115
Figura 142 - Sezione con evidente irregolarità del muro perimetrale.	115
Figura 143 - Sezione verticale con evidente distanza tra la nuvola e parte di muro perimetrale del modello.	116
Figura 144 - Risultati analisi <i>As-built</i> sulla Volta del pronao.	116
Figura 145 - Unità volumetrica della Cappella 17.	117
Figura 146 - File "SMV_Coordinamento".	118
Figura 147 - Inserimento del modello della Cappella 17 nel file "SMV_Coordinamento".	118
Figura 148 - Nuvola fotogrammetrica iniziale (sinistra) e nuvola fotogrammetrica con aggiunta di nuvole laser scanner opportunamente traslate (destra).	119
Figura 149 - Definizione di DTM.	120
Figura 150 - Impostazione dei parametri di <i>Cloth Simulation Filter</i> .	120
Figura 151 - Nuvola implementata pulita tramite il <i>plug-in Cloth Simulation Filter</i> .	121
Figura 152 - DTM ottenuto tramite <i>software CloudCompare</i> e <i>Revit</i> .	121
Figura 153 - Nuvola di punti pulita tramite <i>3DReshaper</i> .	122
Figura 154 - <i>Mesh</i> della nuvola di punti pulita.	123
Figura 155 - Curve di livello ottenute dalla <i>mesh</i> della nuvola di punti.	123

Figura 156 - DTM ottenuto tramite <i>software 3DReshaper</i> e <i>Revit</i>	124
Figura 157 - Inserimento del DTM nel nuovo modello federato.	124
Figura 158 - Individuazione delle coordinate di un punto angolare della gradinata d'ingresso sulla nuvola.	125
Figura 159 - Punto base di progetto del <i>file</i> di coordinamento.	125
Figura 160 - Punto base di progetto del <i>file</i> della Cappella 17.....	126
Figura 161 - Unità volumetrica e DTM all'interno del <i>file</i> di coordinamento.	126
Figura 162 - Modello della Cappella 17 e DTM all'interno del <i>file</i> di coordinamento.	127
Figura 163 - Strati informativi alla base del GIS.....	129
Figura 164 - Entità del modello logico da implementare all'interno del <i>database</i>	131
Figura 165 - Schema grafico dei test di interoperabilità effettuati tra i diversi software.	132
Figura 166 - Creazione <i>database</i> "Main10ance" in <i>PostgreSQL</i>	133
Figura 167 - Creazione nuova origine dati per <i>PostgreSQL</i>	134
Figura 168 - Salvataggio nuova origine dati per <i>PostgreSQL</i>	134
Figura 169 - Compilazione campi della finestra <i>PostgreSQL Connection</i>	134
Figura 170 - Visualizzazione in <i>PostgreSQL</i> del <i>database</i> "Main10ance" esportato.	135
Figura 171 - Tabelle la cui realizzazione è prevista all'interno del DBMS.	136
Figura 172 - Creazione parametri condivisi come da tabella del modello logico.	137
Figura 173 - Finestra di impostazione parametri di progetto.	137
Figura 174 - Connessione del <i>Server</i> in locale.	138
Figura 175 - Creazione nuova origine dati per <i>SQL Server</i>	138
Figura 176 - Compilazione della finestra di impostazioni avanzate.	138
Figura 177 - Creazione della connessione con <i>SQL Server</i>	139
Figura 178 - Test di compilazione dati in ambiente <i>SQL Server</i>	139
Figura 179 - Verifica, in ambiente <i>Revit</i> , della visualizzazione dei dati compilati in <i>SQL Server</i>	139
Figura 180 - Test di compilazione dati in ambiente <i>Revit</i>	140
Figura 181 - Verifica, in ambiente <i>SQL Server</i> , della visualizzazione dei dati compilati in <i>Revit</i>	140
Figura 182 - Test di compilazione dati in ambiente <i>Microsoft Access</i>	141
Figura 183- Verifica, in ambiente <i>Revit</i> , della visualizzazione dei dati compilati in <i>Microsoft Access</i>	141

Figura 184 - Test di compilazione dati in ambiente <i>Revit</i>	141
Figura 185 - Verifica, in ambiente <i>Microsoft Access</i> , della visualizzazione dei dati compilati in <i>Revit</i>	142
Figura 186 - Impostazioni maschera di connessione in ambiente <i>ArcScene</i>	142
Figura 187 - Connessione al <i>database</i> "Main10ance1" e visualizzazione dello stesso in <i>ArcScene</i>	143
Figura 188 - Messaggio di errore all'avvio dell' <i>editing</i>	143
Figura 189 - Esportazione della tabella "Walls" in formato .dbf.	143
Figura 190 - Presenza del campo "OID" nelle tabelle in formato .dbf.....	144
Figura 191 - Importazione delle tabelle in formato .dbf all'interno della connessione attraverso i <i>tool</i> <i>Table to Table</i> e <i>Table to Geodatabase</i>	144
Figura 192 - Aggiunta del comando <i>Add OLE DB Connection</i>	145
Figura 193 - Procedura di connessione OLE DB al <i>database</i> "Main10ance20".	145
Figura 194 - Finestra <i>Add Data</i> in <i>ArcScene</i>	146
Figura 195 - Visualizzazione delle tabelle del <i>database</i> "Main10ance20" in <i>ArcScene</i>	146
Figura 196 - Rimodellazione dell'unità volumetrica all'interno del progetto dettagliato della Cappella 17.	147
Figura 197 - Presenza nella tabella "Mass" delle istanze relative alle Statue e all'unità volumetrica.	148
Figura 198 - Modifica e realizzazione dei parametri condivisi.	149
Figura 199 - Procedura di realizzazione delle relazioni.	149
Figura 200 - Report delle relazioni dell'intero <i>database</i> "Main10ance20".....	150
Figura 201 - Compilazione in ambiente <i>Microsoft Access</i> dell'entità "Walls".	151
Figura 202 - Compilazione in ambiente <i>Microsoft Access</i> dell'entità "Mass".	151
Figura 203 - Compilazione, in ambiente <i>Revit</i> , del campo "UN_VOL_AV".	151
Figura 204 - Visualizzazione, in <i>Microsoft Access</i> , del campo "UN_VOL_AV" compilato.	152
Figura 205 - Inserimento del DTM in formato <i>raster</i> all'interno del LOD 0.	153
Figura 206 – LOD 0 in <i>ArcScene</i>	153
Figura 207 - Impostazioni di estrusione delle unità volumetriche appartenenti al LOD 1.	154
Figura 208 – LOD 1 in <i>ArcScene</i>	154
Figura 209 - Georeferenziazione del modello della Cappella 17.	155

Figura 210 - Procedura di importazione in <i>ArcScene</i> del modello della Cappella 17 mediante lo strumento <i>Quick Import</i>	156
Figura 211 - Inserimento del modello della Cappella 17 in <i>ArcScene</i> e visualizzazione dei diversi <i>layer</i>	156
Figura 212 - Inserimento delle geometrie del LOD 2 in <i>ArcScene</i>	157
Figura 213 - Impostazioni della finestra <i>Layer Properties</i> per l'annullamento dell' <i>offset</i> dei <i>layer</i>	157
Figura 214 – LOD 2 in <i>ArcScene</i>	158
Figura 215 – LOD 3 in <i>ArcScene</i>	158
Figura 216 - Tabella degli attributi del <i>layer</i> "IfcMass_Surface" invariata.....	159
Figura 217 - Modifica del campo "Object Type" con identificativo alfanumerico...159	
Figura 218 - Impostazioni della finestra di <i>Join</i>	160
Figura 219 - Tabella degli attributi del <i>layer</i> "IfcMass_Surface" successiva all'operazione di <i>Join</i>	160
Figura 220 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 1" successivo all'operazione di <i>Join</i>	160
Figura 221 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 2" successivo all'operazione di <i>Join</i>	161
Figura 222 - Modifica del campo "Object Type" con identificativo alfanumerico...161	
Figura 223 - Impostazioni della finestra di <i>Join</i>	161
Figura 224 - Risultato dell'identificazione del "Muro Edificio circolare" successivo all'operazione di <i>Join</i>	162
Figura 225 - Risultato dell'identificazione del "Muro Frontale Pronao" successivo all'operazione di <i>Join</i>	162
Figura 226 - Impostazioni della finestra <i>Relate</i>	163
Figura 227 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 1" successivo all'operazione di <i>Relate</i>	163
Figura 228 - Aggiornamento dei dati in ambiente <i>Revit</i>	164
Figura 229 - Visualizzazione dei dati aggiornati in ambiente <i>Microsoft Access</i>	164
Figura 230 - Visualizzazione dei dati aggiornati in ambiente <i>ArcScene</i>	164

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Tipologie di dati utilizzate per la memorizzazione del database di Main10ance.	15
Tabella 2 - Schema di metodi di rilievo in funzione di scala e oggetto da rilevare.....	37
Tabella 3 - Caratteristiche <i>laser scanner</i> FARO CAM 2.	51
Tabella 4 - Classificazione degli UAV <i>Tactic</i> a cura della <i>Unmanned Vehicle Systems International Association</i>	56
Tabella 5 - Caratteristiche fotocamera SONY nex5.	58
Tabella 6 - Estratto del <i>file</i> delle coordinate compensate dei vertici e degli scarti quadratici medi relativi alla campagna di rilevamento del 2016 ed ottenute dal <i>software StarNet</i>	63
Tabella 7 – Valori massimi e minimi degli scarti quadratici medi.....	63
Tabella 8 - Gruppi di scansione utilizzati per la pulizia delle nuvole di punti.	76
Tabella 9 - Dimensioni ultime di ciascun file.....	79
Tabella 10 - Numero di punti relativo alle diverse sezioni.....	84
Tabella 11 – Criticità e potenzialità delle principali fasi della metodologia utilizzata.	166

Abstract

Il senso di appartenenza ad un territorio ricco di siti dall'elevata valenza storico-architettonica e paesaggistica, riconosciuti universalmente, accresce la consapevolezza di dover contribuire alla sua valorizzazione e tutela. A supporto di tali attività, le tecnologie digitali, sempre più applicate al settore dei beni culturali, favoriscono lo sviluppo di soluzioni pratiche e innovative.

Nella presente tesi, a partire da nuvole di punti, ottenute attraverso tecniche integrate di rilievo (*laser scanning* e fotogrammetria) e proseguendo con la modellazione HBIM di una delle cappelle del Sacro Monte di Varallo, si è individuata una metodologia per la consultazione e compilazione trasversale dei dati (in DBMS, software BIM e GIS) necessari a conoscere, documentare e proteggere il patrimonio culturale.

The sense of belonging to a territory that is rich in sites with a high historical-architectural and landscape value as well as being universally recognised, increases the awareness of having to contribute to its enhancement and protection. To support these activities, digital technologies, increasingly applied to the cultural heritage sector, favour the development of practical and innovative solutions.

In this thesis, starting from point clouds, obtained through integrated surveying techniques (laser scanning and photogrammetry) and then with the HBIM model of one of the chapels of the Sacro Monte di Varallo, a methodology for necessary data cross consultation and compilation was identified (in DBMS, BIM and GIS software) to be able to know, to document and to protect cultural heritage.

Introduzione

Il ruolo di centralità ed eccellenza del nostro Paese per la sua eredità artistico-culturale è affermato a livello internazionale, tanto da essere, insieme alla Cina, la nazione con maggior numero di siti nella lista dell'UNESCO. In particolare, attualmente sono riconosciuti dall'organizzazione ben 55 siti di cui 5 naturali e 8 paesaggi culturali.

L'Italia, dunque, sede di un così elevato numero di beni culturali e ambientali, non può permettersi di restare passiva dinanzi a tali risorse ed è tenuta a investire in ricerca e innovazione attraverso fondi nazionali e/o usufruendo di finanziamenti europei per la loro valorizzazione e conservazione.

A questo proposito nasce Main10ance, un progetto che fa parte del Programma di cooperazione transfrontaliera *Interreg V-A Italia-Svizzera 2014-2020*, finanziato dall'Unione Europea per valorizzare le risorse comuni delle aree di frontiera, quali i Sacri Monti di Piemonte, Lombardia e Svizzera.

Il presente lavoro di tesi si contestualizza proprio nell'ambito di ricerca del Politecnico di Torino (dipartimenti DIATI e DISEG), al fine di sviluppare, per il suddetto progetto, una piattaforma informativa utile a preservare nonché incrementare l'attrattività del Sacro Monte di Varallo, paesaggio culturale riconosciuto nel 2003 come sito UNESCO.

Il fulcro di questo strumento operativo è un *database* multi-scala e interoperabile la cui scelta è stata determinata dalla realtà paesaggistica, frutto dell'opera combinata di natura e uomo che concorre a definire un'immagine dall'elevata specificità e complessità.

La tesi di ricerca si pone l'obiettivo di descrivere la metodologia impiegata per l'elaborazione del *database* in questione in grado di archiviare e gestire informazioni alla scala territoriale e del costruito.

Si parte dallo studio degli standard esistenti a livello nazionale e internazionale che permettono di definire la struttura della banca dati, si dimostra come strumenti digitali offerti dalle recenti tecnologie possano contribuire, con la creazione di modelli virtuali, all'effettiva realizzazione della stessa, fino a occuparsi dell'interoperabilità tra DBMS e *software* BIM e GIS, valutando le varie possibilità al fine di evitare perdite di informazioni durante lo scambio.

Occorre, inoltre, sottolineare che a dimostrazione del contributo apportato dagli strumenti digitali, è stato generato, avvalendosi della metodologia HBIM, il modello virtuale della Cappella 17- La Trasfigurazione, appartenente al complesso devozionale, basandosi sul prodotto di tecniche innovative di rilievo integrate quali nuvola fotogrammetrica e da *laser scanner*.

L'utilizzo integrato delle precedenti nuvole di punti è stata la soluzione ottimale per una conoscenza completa del patrimonio culturale in merito a dati metrici oltre che morfologici, cromatici e di posizione degli oggetti.

La tesi consta di sette capitoli: nel capitolo 1, partendo dalla definizione di patrimonio culturale e illustrando il rilievo assunto dalle attività di manutenzione, si esaminano il progetto Main10ance e le strategie operative proposte dal Politecnico di Torino, fino alla descrizione del modello logico del database realizzato. Il capitolo 2 si incentra su un inquadramento storico, del significato e delle motivazioni che hanno portato alla realizzazione dei Sacri Monti di Piemonte e Lombardia, si entra nel merito del Sacro Monte di Varallo e della Cappella 17, descrivendo le attività di manutenzione eseguite sul complesso e analizzando l'architettura e il valore artistico dell'edificio; il capitolo 3 affronta in termini teorici le tecniche di rilievo utilizzate e le metodologie operative messe a punto per l'acquisizione dei dati. Il capitolo 4 descrive le procedure di elaborazione dei dati relativi all'intero complesso e alla Cappella 17, passando in rassegna i software utilizzati; i capitoli 5 e 6 partono da un'analisi degli approcci BIM ed HBIM per giungere all'applicazione di tali metodologie per la realizzazione di un modello virtuale della Cappella 17 e del DTM quale superficie di appoggio per un modello federato; infine nel capitolo 7 dopo la valutazione dell'interoperabilità di differenti software, è realizzato il modello fisico del database.

1 Patrimonio culturale: risorsa da valorizzare e trasmettere

“Il patrimonio culturale è un concetto ampio che include l’ambiente naturale così come quello culturale. Comprende paesaggi, luoghi storici, siti e ambienti costruiti dall’uomo, così come la biodiversità, le collezioni, le pratiche culturali del passato e del presente, le esperienze di vita e la conoscenza. Esso registra ed esprime i lunghi processi di sviluppo storico, che formano l’essenza delle diverse identità nazionali, regionali, indigene e locali ed è parte integrante della vita moderna. È un punto di riferimento dinamico e uno strumento positivo per la crescita e il cambiamento. Il patrimonio culturale specifico e la memoria collettiva di ciascuna località o comunità non è sostituibile ed è una base importante per lo sviluppo presente e futuro.” Così l’ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*), in occasione della dodicesima Assemblea generale tenutasi in Messico nell’Ottobre del 1999, da una delle definizioni più esaustive in merito al concetto di patrimonio culturale.

In questa definizione è chiaramente espresso che con il termine “patrimonio culturale” si identificano beni culturali e beni paesaggistici. Nello specifico, per beni culturali sono intese le testimonianze, immobili e mobili, di una civiltà che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico. Sono beni paesaggistici, invece, aree e luoghi intimamente legati all’immagine storica, culturale, naturale, morfologica ed estetica di un territorio quali, ad esempio, centri storici delle città e piccoli borghi, ambienti urbani o rurali, a cui la storia ha dato forma.

L’insieme di questi beni rappresenta la ricchezza di un luogo e del popolo che lo abita, in quanto criterio costitutivo e identificativo degli stessi, nato da un processo di accumulazione delle generazioni che si sono susseguite.

A seconda del numero di individui che per identità sociale, etnica o territoriale si riconosce in esso, si può distinguere un patrimonio culturale a diversa scala, ovvero, locale, nazionale, o, ancora, rappresentativo dell’intera umanità, come quello definito dalla lista dell’UNESCO.

In quanto tale, quindi, il patrimonio culturale costituisce una risorsa ereditata da preservare e trasmettere alla generazione presente e a quelle future; sono necessarie, dunque, attività di tutela, conservazione e valorizzazione, azioni possibili solo

attraverso la conoscenza approfondita di ciascun bene e attuabili tramite opportuni interventi di sensibilizzazione e comunicazione oltre che mediante tecniche atte a mantenerne l'integrità e l'efficienza funzionale, quali manutenzione e restauro.

È doveroso precisare che, ormai da tempo, la manutenzione preventiva e programmata, finalizzata alla conservazione intatta del fascino e del valore di un bene, è favorita ai diretti processi di restauro da attuare, invece, come *extrema ratio* in quanto interventi più intrusivi¹ e solo riparativi. La prima, infatti, è una strategia di studio, monitoraggio, prevenzione e intervento che consente di contenere il declino e deterioramento, naturale e inevitabile, degli elementi costituenti il bene stesso, evitando o per lo meno ritardando interventi di maggiore ampiezza, quali il restauro, che solitamente si effettuano a danno già avvenuto, quando ormai le testimonianze storico-culturali sono compromesse.

Oggi, lo sviluppo tecnologico offre considerevoli possibilità, infatti, mediante la creazione di prodotti digitali, quali piattaforme informative, si è in grado di raccogliere, archiviare, elaborare, utilizzare e aggiornare dati per l'attuazione e la gestione delle attività manutentive oltre che per la fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale.

1.1 Progetto Main10ance

"I Sacri Monti: patrimonio comune di valori, laboratorio per la conservazione sostenibile ed una migliore fruibilità turistica dei beni culturali" con acronimo MAIN10ANCE, è un progetto che fa parte del Programma di cooperazione transfrontaliera *Interreg V-A Italia-Svizzera 2014-2020*, finanziato dall'Unione Europea al fine di valorizzare le risorse di cui dispongono le aree di frontiera [Figura 1].



Figura 1 - Progetto Main10ance.

¹ GIULIA TOTARO, Attività di manutenzione e cura sui beni culturali architettonici: strategie e politiche di incentivazione, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2010.

Lo stesso rientra in uno dei cinque assi declinati dal programma *Interreg*, i quali rappresentano i principali ambiti di intervento che possono trarre vantaggio dalla collaborazione dei due Paesi.

In particolare, Main10ance appartiene all'*Asse 2 - Valorizzazione del patrimonio naturale e culturale*, orientato a incrementare l'attrattiva delle aree, promuovendo l'uso sostenibile di risorse naturali e culturali, potenziandole in maniera integrata.

Ardito e alquanto complesso per via della sua multidisciplinarietà, quello dei Sacri Monti è un progetto culturale di promozione, ricerca, formazione e informazione, che mira, analizzando e riscoprendo tali complessi monumentali, a realizzare, attraverso soluzioni innovative, un modello di ottimale conservazione adattabile a diversi siti.

Oltre ai due capofila Università del Piemonte Orientale e Scuola Universitaria della Svizzera Italiana, i partner coinvolti sono Ente di Gestione dei Sacri Monti, Politecnico di Torino, Centro per la Conservazione e il Restauro della Venaria Reale, Regione Piemonte, Confartigianato Imprese Piemonte Orientale, Ufficio dei Beni Culturali e Dipartimento della Logistica del Cantone Ticino.

L'unione e la cooperazione di questi ultimi è fondamentale nei diversi *Work Package* (pacchetti di lavoro) in cui è scomposto il WBS (*Work Breakdown Structure*) di progetto ed in particolare il Politecnico di Torino è tra i partecipanti allo sviluppo del WP 3.3 che prevede la messa a punto di strumenti metodologici e operativi in grado di guidare committenze, enti di gestione e controllo e professionisti a sviluppare un piano di conservazione programmata del patrimonio culturale improntato su principi di sostenibilità, con una visione a lungo termine degli interventi previsti e ottimizzando le risorse disponibili².

1.1.1 Tecnologie e strumenti

Questo lavoro di tesi nasce proprio nel contesto di ricerca, da parte del DIATI del Politecnico di Torino, per lo sviluppo dei suddetti strumenti operativi in ausilio alla manutenzione dei Sacri Monti. La metodologia che si cerca di concretizzare consiste nella realizzazione di una piattaforma informativa supportata da un *database* e strumenti integrati di visualizzazione tridimensionale a loro volta collegati al *database* stesso in modo che questi ultimi, insieme, possano essere interrogati e implementati reciprocamente.

² Piano di lavoro di "I Sacri Monti: patrimonio comune di valori, laboratorio per la conservazione sostenibile ed una migliore fruibilità turistica dei beni culturali" - MAIN10ANCE.

In particolare, con “strumenti integrati di visualizzazione tridimensionale” si intendono strumenti di modellazione legati all’edilizia e basati sulla metodologia BIM e moderni sistemi informativi territoriali ovvero i GIS [Figura 2]. Queste metodologie, approfondite nei capitoli successivi, possono considerarsi contenitori di informazioni a scala differente ed è, proprio, in questo contesto che il dato informativo, all’interno di un unico *database*, diventa l’elemento centrale di tale strategia operativa.

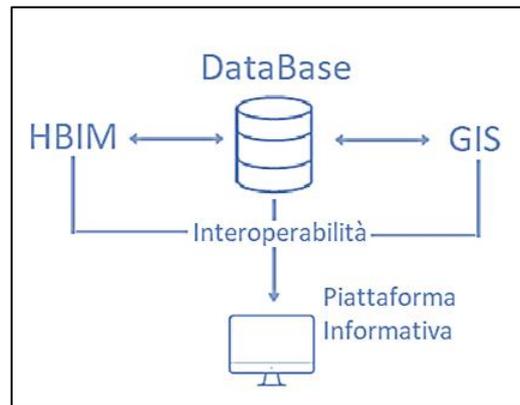


Figura 2 - Schema riassuntivo degli strumenti operativi di supporto al progetto Main10ance.

L’obiettivo, in linea con le richieste di progetto, è quello di utilizzare sistemi semplici, agili ed efficaci oltre che a diversa scala, agevolando, a seconda dei diversi ambiti, la fruibilità degli stessi da parte di utenti con competenze e background differenti, a partire da professionisti esperti, manutentori, enti di gestione o semplici cittadini e visitatori. Tale soluzione risulta un valido ausilio per l’attività di conservazione e manutenzione, includendo, in aggiunta, la possibilità di valorizzazione del patrimonio stesso.

1.1.2 Presupposti per un *database* interoperabile e multi-scala: analisi degli *Standard*

Lo scheletro della strategia avanzata, proposta per il progetto Main10ance, è un *database* relazionale interoperabile e multi-scala, che risponde alla necessità di archiviare e gestire vari tipi di dati di provenienza eterogenea e a scala differente a partire da informazioni territoriali del contesto, tipiche dei GIS, fino a quelle relative ai singoli edifici tipiche dei BIM.

L’intento preliminare nella progettazione del *database* è quello di garantirne la sua massima interoperabilità al fine di abbattere le barriere di cooperazione transfrontaliere e di rendere l’infrastruttura dei dati utilizzabili in qualsiasi contesto.

Si è partiti, dunque, da un'attenta disanima degli *standard*, nazionali e internazionali, dediti alla gestione dei dati in modo che la struttura del *database* di Main10ance fosse un'estensione e integrazione di modelli già esistenti.

Gli *standard* esaminati riguardano infrastrutture di dati relative a scale di riferimento differenti che vanno dalle classificazioni del territorio fino a quelle di opere d'arte e conservazione. Ciò è giustificato dal fatto che il *database* di Main10ance deve essere strutturato per accogliere diversi beni ambientali e culturali ma anche beni culturali all'interno di altri e a loro volta inclusi in quelli ambientali, quali i vari siti dei Sacri Monti presenti in Lombardia e Piemonte, gruppi di cappelle in pregevoli esempi di architetture di paesaggi, fino a statue e dipinti contenuti nelle singole cappelle.

Per la realizzazione delle infrastrutture relative ai dati territoriali e urbani è stato fatto riferimento ai seguenti [Figura 3]:

- CityGML (*Geography Markup Language*): modello di dati standardizzato aperto utilizzato per lo scambio di dati e per l'archivio di modelli tridimensionali di città e paesaggi;
- INSPIRE (*IN*frastructure for *SP*atial *IN*foRmation in Europe - Infrastruttura per l'Informazione Territoriale in Europa): progetto della Commissione europea nato per realizzare infrastrutture di dati territoriali nella Comunità europea;
- BDTRE (Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti): base dati geografica del territorio piemontese promossa dalla Regione Piemonte, strutturata secondo le "Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei *database* geotopografici".



Figura 3 - Standard nazionali e internazionali di mappatura.

Considerata la suddetta necessità di gestire dati caratterizzati da una scala sempre più accurata, come punto di partenza per la realizzazione del *database* oggetto di studio,

sono stati considerati i dati di CityGML in quanto supportano cinque livelli di dettaglio, “Levels of Detail”, (LoD). Questo *standard*, infatti, ha permesso di definire oggetti urbani in scala fino all’1:500 [Figura 5]. I LoD riguardano entità di diverse classi tematiche, ma sono incentrati, in particolare, su centri urbani e edifici la cui complessità geometrica e semantica cresce progressivamente con le cinque istanze [Figura 4]:

- LoD 0: si riportano dati bidimensionali relativi all’ambiente e agli edifici attinenti al Digital Terrain Model;
- LoD 1: si riportano dati in 2,5D, modellando l’edificio come un blocco tridimensionale privo di copertura;
- LoD 2: si riportano dati tridimensionali, modellando l’edificio con relativa copertura;
- LoD 3: si riportano dati tridimensionali, includendo aperture dell’edificio, quali porte e finestre, oltre a dettagli esterni delle coperture;
- LoD 4 si riportano dati tridimensionali, comprensivi di una rappresentazione interna degli edifici.

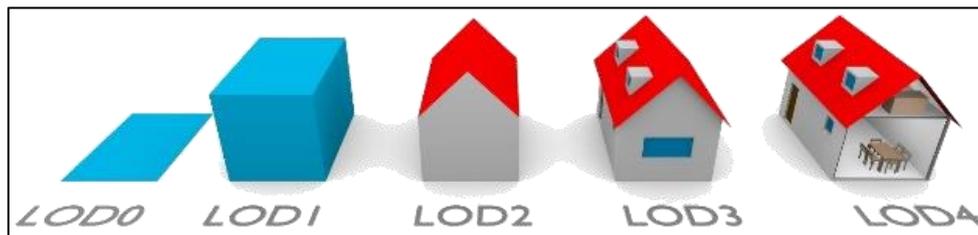


Figura 4 - Livelli di dettaglio previsti in CityGML.

Fonte: CHIABRANDO F.; COLUCCI E.; LINGUA A. M.; MATRONE F.; NOARDO F.; SPANÒ A., *A European Interoperable Database (EID) to increase resilience of cultural heritage*.

	LoD 0	LoD 1	LoD 2	LoD 3	LoD 4
Model scale description	Regional, landscape	City, region	City district	Architectural models (outside), landmark	Architectural model (interior)
Class of accuracy	Lowest	Low	Middle	High	Very high
Accuracy of position and height	Lower than LoD 1	5 m	2 m	0.5 m	0.2 m
Approximate representation scale	Maximal generalization	1:25,000–1:10,000	1:10,000–1:5000	1:2500–1:1000	1:1000–1:500
Generalization	Maximal generalization	Object blocks as generalized features >6 × 6 m	Objects as generalized features >4 × 4 m	Object as real features >2 × 2 m	Constructive elements and openings are represented
Building installation	no	no	yes	Representative exterior effects	Real object form
Roof form/structure	yes	flat	Roof type and orientation	Real object form	Real object form

Figura 5 - LoD 0-4 di CityGML con i loro requisiti di precisione.

Fonte: DE RUVO V.; COLUCCI E.; LINGUA A. M.; MATRONE F.; RIZZO G., *HBIM-GIS Integration: From IFC to CityGML Standard for Damaged Cultural Heritage in a Multiscale 3D GIS*, APPLIED SCIENCES, 2020.

Tra i temi dei tre diversi allegati, in cui sono organizzati i dati di INSPIRE, invece, si è fatto riferimento, ai soli “*Elevation*” e “*Orthoimagery*” ampliando le infrastrutture considerate di CityGML [Figura 6].

INSPIRE Directive - Data themes



Figura 6 - Temi INSPIRE raggruppati nei tre allegati

Successivamente, i modelli di dati vagliati dagli *standard* CityGML e INSPIRE sono stati ampliati dai dati BDTRE presi in considerazione, soprattutto, per la nomenclatura e gli attributi da associare alle diverse entità.

Per quel che riguarda l'architettone e nel dettaglio per l'individuazione, la nomenclatura e la definizione degli elementi costituenti l'edificio si è fatto riferimento ai due seguenti *standard*:

- IFC (*Industry Foundation Classes*): modello di dati neutro, sviluppato dall'“*International Alliance for Interoperability*”, utile a raccogliere informazioni relative a tutto il ciclo di vita di un edificio e dei suoi impianti;
- Getty Vocabulary – *Art and Architecture Thesaurus* (AAT): vocabolario, sviluppato dal “*Getty Research Institute*”, strutturato di concetti tra cui termini, descrizioni, citazioni bibliografiche e altre informazioni relative a belle arti, architettura, arti decorative, materiali d'archivio e culturale.

La combinazione delle diverse entità riguardanti il patrimonio culturale è stata supportata dallo *standard* CIDOC (*Conceptual Reference Model*) - CRM: *standard* ISO internazionale sviluppato dall'“*International Committee for Documentation*” dell'“*International Council of Museums*” (CIDOC/ICOM). Ontologia di 81 Classi e

132 Proprietà che descrive le caratteristiche e le relazioni esistenti tra le risorse culturali.

Si è scelto, inoltre, di anettere ai “*Levels of Detail*” di CityGML i “Livelli di sviluppo degli Oggetti Digitali” (LOD) dello *standard* UNI 11337-4 in modo da poter raggiungere nella definizione delle informazioni relative agli edifici un grado di precisione tipico di una scala architettonica.

In generale, la norma italiana UNI 11337:2017 è un documento articolato in dieci parti di cui sei già pubblicate, che tratta di gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. La Parte 4 (UNI 11337-4:2017) interessa l’evoluzione e lo sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti; introduce i “Livelli di sviluppo degli Oggetti Digitali” (LOD), indicanti il grado di affidabilità delle informazioni per ciascuna delle fasi di un processo BIM.

Nel caso in esame, però, i livelli di sviluppo sono trattati come livelli di dettaglio.

Pertanto, dei sette LOD previsti, identificati dalla lettera A fino alla G, i primi integrano i dati dei LoD 2, 3, 4 di CityGML [Figura 7] e gli ultimi due (LOD F e LOD G), che nascono per gestire l’articolazione necessaria ad affrontare in BIM progetti di restauro e conservazione del patrimonio costruito, permettono di introdurre nella struttura del *database* informazioni relative a materiali e forme di alterazione, incrementando, dunque, i “*Levels of Detail*” di CityGML fino al LoD 5 [Figura 8].



Figura 7 - Integrazione dei LoD di CityGML e i LOD dell'UNI11337-4:2017.



Figura 8 - Incremento dei LoD di CityGML.

In ultimo, la nomenclatura, la semantica e l’individuazione dei problemi di conservazione sono state introdotte nell’infrastruttura dei dati su fondamento dello

standard UNI 11182:2006 che affronta la scelta e la definizione dei termini utili per indicare le differenti forme di alterazione e degradazione visibili a occhio nudo.

È ancora da sottolineare che i 6 LOD sono, per di più, utili per filtrare e limitare l'accesso ai dati a seconda degli interessi dell'utenza, permettendo, ad esempio, la fruizione delle informazioni relative ai LOD 0-5 ai soli Enti gestori, quelle dei LOD 0-2 ai turisti e manutentori del verde e quelle dei LOD 3-5 ai restauratori, artigiani e professionisti del settore.

1.1.3 Progettazione di un *database*

La progettazione del *database* di Main10ance è stata un'operazione di estrema rilevanza e per la quale ci si è basati sui teorici processi di sviluppo di una generica banca dati che hanno consentito di trasformare la realtà percepita in un linguaggio comprensibile al calcolatore.

La progettazione di una banca dati segue un'architettura standardizzata che distingue tre principali fasi [Figura 9]:

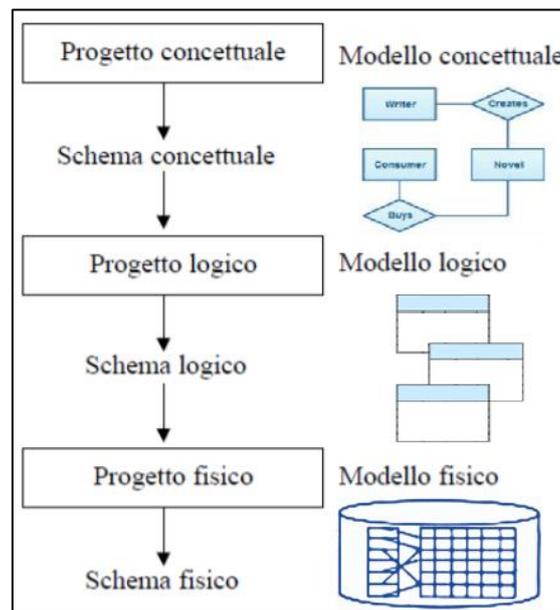


Figura 9 - Processi di sviluppo del database di Main10ance

- **Progettazione concettuale:** si rappresenta la complessa realtà di interesse per mezzo di una descrizione formale indipendentemente dai criteri di rappresentazione utilizzati dai DBMS (*DataBase Management System*), ovvero, i sistemi per la gestione delle basi di dati. L'*output* di tale fase è il cosiddetto schema concettuale che si attiene a un modello concettuale di dati.

Nel *database* oggetto di studio, il modello concettuale utilizzato è stato l'*Entity-Relationship* (ER) il quale si basa essenzialmente sul concetto che la realtà da rappresentare è composta da entità, ovvero classi di oggetti, ognuna delle quali è caratterizzata da specifiche proprietà dette attributi e, inoltre, una o più entità possono essere connesse tra loro attraverso associazioni.

Lo schema concettuale ovvero il diagramma ER è, quindi, una rappresentazione semplificata ma il più possibile completa della realtà.

- Progettazione logica: fase in cui si effettua una preliminare ristrutturazione del diagramma ER in modo da ottimizzarlo e semplificarlo ulteriormente al fine di renderne tutti i costrutti traducibili nel modello logico. Il prodotto di questa progettazione, infatti, è la traduzione del diagramma ER ristrutturato in uno schema logico che fa riferimento a un modello logico dei dati.

In generale, il modello logico è utilizzato per definire l'organizzazione ed il formato dei dati. Si è utilizzato un modello relazionale caratterizzato dall'uso di strutture dati in tabelle, ovvero le relazioni (traduzione delle entità) e da connessioni tra quest'ultime.

- Progettazione fisica: consiste nell'implementazione dello schema logico nella memoria di massa ovvero viene fisicamente realizzato il *database* sul calcolatore.

Modello concettuale di Main10ance

L'individuazione delle entità nel modello concettuale è stata dettata dalla scelta di utilizzare, per la struttura del database, i sei Livelli di Dettaglio (LOD) precedentemente illustrati. È evidente, infatti, nello schema relativo, riportato nell'allegato A1, come gli oggetti rappresentativi della realtà siano stati mappati con una sorta di "gerarchizzazione" che va da una generica "LOCALITÀ SIGNIFICATIVE" sino ad un minuzioso "AFFRESCO". Le entità relative al tema "Edificio" occupano uno spazio abbastanza rilevante all'interno dello schema ma, viste le molteplici finalità che caratterizzano il database, non devono comunque risultare secondarie quelle attinenti alla classe tematica "Ambiente Esterno".

Per quanto riguarda le associazioni, si evidenzia come, nonostante la presenza di diversi oggetti cartografici, non sia stato necessario considerare altri legami spaziali ad eccezione di quelli con la classe "LOCALITÀ SIGNIFICATIVE", strutturata proprio con funzione di orientamento sul territorio e localizzazione dei luoghi [Figura 10].

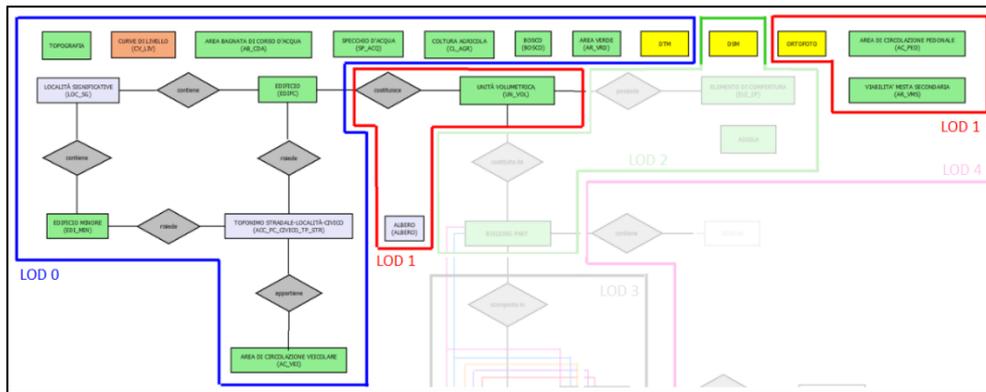


Figura 10 - Porzione del Modello Concettuale di Main10ance in cui si evidenzia l'unico legame spaziale con l'entità "LOCALITA' SIGNIFICATIVE".

Ciascuna entità e i relativi attributi, nel diagramma ER, sono stati rappresentati graficamente all'interno di due rettangoli adiacenti, mentre le associazioni sono state annotate mediante un rombo posto nella mezzeria del segmento che unisce due o più entità. Per una maggiore chiarezza visiva si è scelto di mantenere i soli rettangoli attinenti alle entità e di dare colori differenti ai segmenti delle associazioni n-arie ovvero quelle che legano n entità. Inoltre, sempre con l'ausilio dei colori sono state evidenziate le diverse tipologie di dati (raster, vettoriali ecc..) e gli enti geometrici di rappresentazione degli stessi.

Per visualizzare lo schema concettuale completo si rimanda all'Allegato A1.

Modello logico di Main10ance

Al fine di realizzare il modello logico del *database* di Main10ance è stata necessaria una ristrutturazione, ovvero un'ulteriore semplificazione, del diagramma ER in modo che lo schema logico potesse descriverne in maniera corretta tutte le informazioni. A tale scopo, si è ritenuto opportuno l'accorpamento di alcune entità quali, ad esempio, "Area Di Circolazione Pedonale" inglobata in "Area Di Viabilità Mista Secondaria" assimilandone gli attributi [Figura 11].

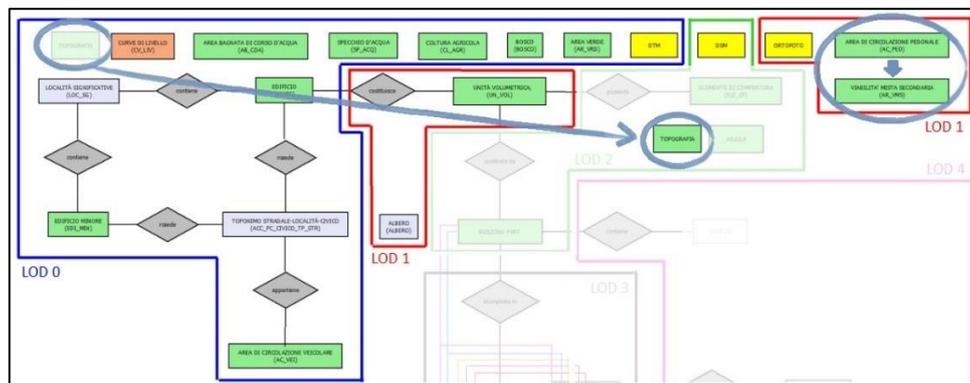


Figura 11 - Porzione del Modello concettuale in cui sono evidenziate alcune operazioni di ristrutturazione.

Dopo la fase di ristrutturazione si è dunque proceduto alla traduzione del diagramma ER nello schema logico così che la struttura di dati fosse comprensibile all'elaboratore. Le entità sono state, dunque, rappresentate mediante relazioni (tabelle), specificando la tipologia di dato di ciascun attributo [Figura 12].

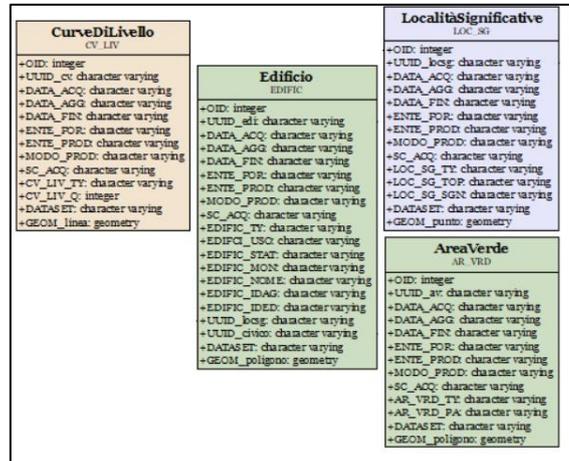


Figura 12 - Esempio di entità rappresentate mediante relazioni. Sono evidenti la sigla dei nomi e la tipologia di dato associati a ciascun attributo.

Le tipologie di dati utilizzate nel modello locale in questione sono le seguenti:

Character Varying	Corrisponde a una stringa di caratteri a lunghezza variabile con la lunghezza massima specificata. La lunghezza predefinita è 1 carattere. La lunghezza massima è 31995 caratteri.
Geometry	Tipo di dato ad oggetti, multiforme (può contenere dati a 2, 3 o 4 dimensioni) che contiene la geometria (punti, linee, poligoni, solidi) di un singolo oggetto.
Integer	Tipo di dato numerico che corrisponde a un valore intero nell'intervallo compreso tra -2147483648 e 2147483647.
Raster	Tipo di dati consistente in una matrice di celle (pixel) al cui interno è possibile memorizzare un valore che rappresenta le informazioni stesse.

Tabella 1 - Tipologie di dati utilizzate per la memorizzazione del database di Main10ance.

Inoltre, i nomi degli attributi, definiti campi, sono stati abbreviati rispetto a quelli del modello concettuale attenendosi il più possibile, come già esplicitato, alla nomenclatura degli *standard*.

Tra tutti gli attributi di ciascuna entità è stato definito l'unico caratterizzante detto chiave primaria, che descrive univocamente l'entità a cui è associato [Figura 13].

Nello schema sono presenti le associazioni realizzate inserendo le chiavi esterne ovvero attributi extra, corrispondenti a quelli che costituiscono la chiave primaria di un'altra relazione, in modo da avere un campo comune tra le entità che si vuole collegare.

Preferenzialmente, tale campo è stato aggiunto dove la cardinalità risulta favorevole (nota come numero massimo).

Fondamentale, infatti, è stata la definizione delle cardinalità di ciascuna associazione che rappresentano il numero di volte in cui un'istanza di entità può partecipare all'associazione. Per ogni associazione è specificato il numero minimo e massimo di occorrenze possibili.

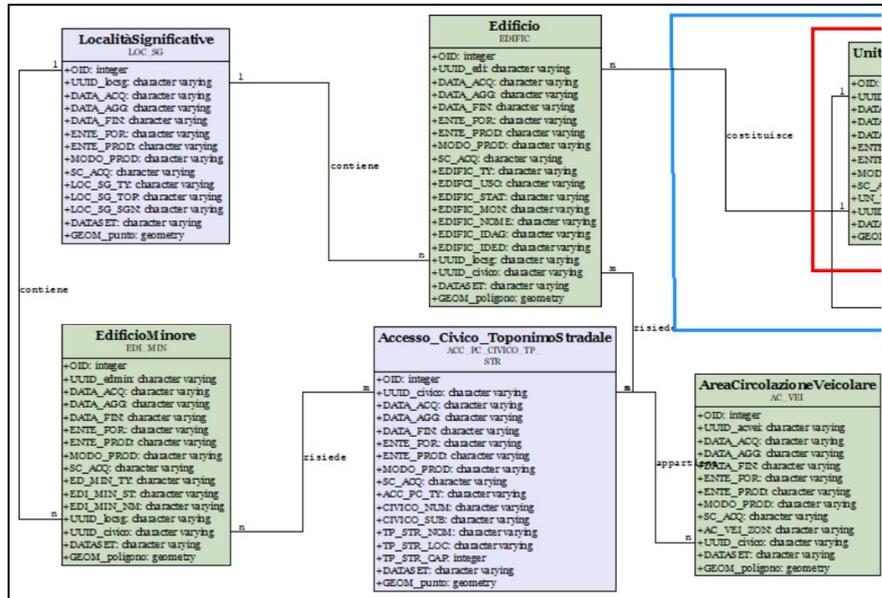


Figura 13 - Porzione del Modello logico del database di Main10ance in cui sono evidenti: chiavi primarie, chiavi esterne e cardinalità delle associazioni.

Nello schema logico in questione, esistono associazioni:

- “uno a molti” (1: n) → ogni istanza della prima entità si può associare a una o più istanze della seconda entità, mentre ogni istanza della seconda entità si deve associare a una sola istanza della prima.

Questo è il caso, ad esempio, del legame tra “Località Significative” e “Edificio”, per cui una località significativa può contenere più edifici, mentre un edificio si trova in una sola località significativa;

- “molti a molti” (n: m) → ogni istanza della prima entità si può associare a una o più istanze della seconda entità e viceversa.

Un esempio chiarificatore può essere quello del legame logico tra l’entità “Edificio” e “Accesso_Civico_ToponimoStradale”, per cui un edificio può risiedere su uno o più toponimi stradali ed un toponimo stradale può ospitare uno o più edifici.

Per una visualizzazione completa del modello logico si rimanda all’Allegato A2.

2 I Sacri Monti di Piemonte e Lombardia

L'origine dei Sacri Monti fu un'invenzione geniale che si sviluppò, alla fine del Quattrocento, in rapporto alla grande crisi socio-economica-religiosa dell'Occidente. Tra la fine del XV e l'inizio del XVII secolo, per i pellegrini diventava sempre più costoso e pericoloso raggiungere i luoghi santi di Gerusalemme e della Palestina in Medio Oriente a causa della grande espansione dell'Impero Ottomano. Per non precludere loro la possibilità di provare quest'esperienza spirituale, nacquero i nove Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia. Parallelamente, lo sviluppo di tali luoghi cruciali venne favorito, anche, dalla minacciosa espansione della Riforma Luterana (1517). In un momento di crisi del cattolicesimo, i sacri monti ebbero, dunque, il compito di trasmettere la fede cristiana contrastando, contemporaneamente, anche, le influenze protestanti che potevano arrivare dalla Germania. Testimonianza ne è il fatto che questi siti sono per la maggior parte situati nelle Alpi e Prealpi nord-occidentali tra Oropa e Varese, come se l'intenzione dei proponenti fosse quella di creare uno sbarramento della fede nei confronti della riforma protestante [Figura 14].

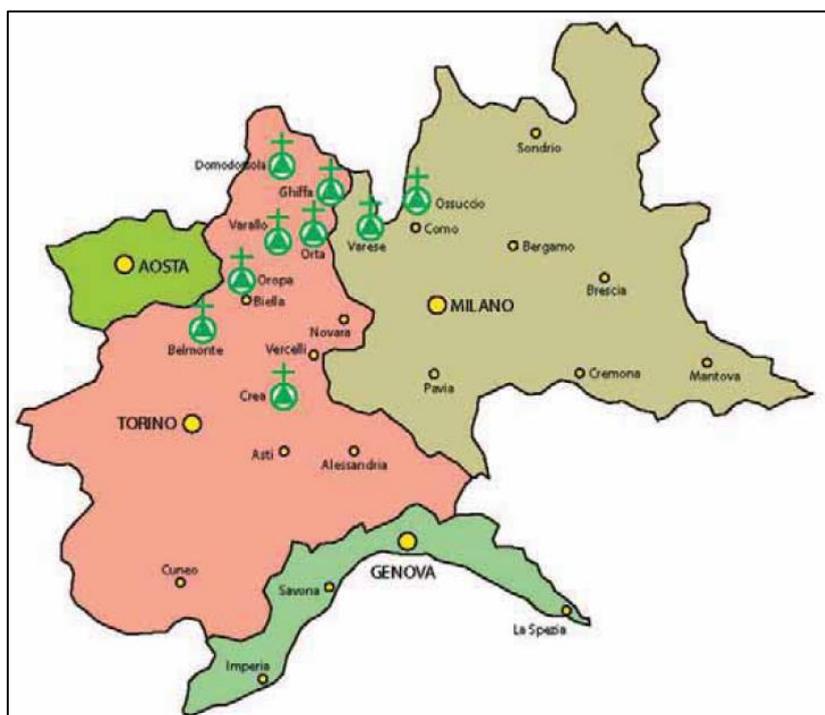


Figura 14 - Localizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia.

Fonte: Sacri monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2010.

La diocesi milanese, ed in particolare Carlo Borromeo, Arcivescovo di Milano, promosse il progetto spirituale proposto dalla Congregazione dei Frati Minori Osservanti che diedero vita a queste “fiaccole della fede accese lungo le Alpi, a difesa contro le minacce del Nord”, come scrisse Rudolf Wittkower nel 1959.³

Si tratta di caratteristici complessi religiosi che spesso hanno ereditato in parte sviluppi precedenti, ovvero, sono stati fondati presso antichi Santuari o luoghi già, in passato, siti di culto, nati da forme spontanee di devozione.

Nel dettaglio, sono gruppi di cappelle ed altri manufatti architettonici, dedicati a differenti aspetti della fede cristiana, situati non a caso in ambiente pedemontano ed integrati in modo armonico con l’ambiente naturale e paesaggistico circostante che, spesso, ha il sopravvento anche sull’operato di alcuni architetti di spiccata fama e autoritaria personalità creativa, come accade per Varese e Varallo [Figura 15].



Figura 15 - Sacro Monte di Varese.

Fonte: <https://www.circoloquartostato.it/evento/camminata-dellamicizia-2019-quarto-sacro-monte/sacro-monte-di-varese/>

La scelta di questi luoghi incontaminati e pieni di boschi, raggiungibili solo attraverso ardui itinerari da percorrere a piedi, è giustificata dal voler indurre i pellegrini alla meditazione e alle riflessioni spirituali; attraverso le forme, i materiali, i giochi di luce, infatti, non solo si può rendere memorabile l’esperienza ma si suscitano particolari emozioni nei visitatori, portandoli a una sorta di unione spirituale con Dio.

Oltre al loro significato simbolico e spirituale, possiedono suggestive doti di bellezza, anche, dal punto di vista architettonico e contengono importanti reperti artistici quali affreschi e statue. Attraverso la pittura, la scultura e l’architettura, infatti, è rappresentata la storia sacra dell’Antico e del Nuovo Testamento [Figura 16]. Queste forme d’arte avevano come obiettivo quello di incentivare i fedeli, mediante la vista, a

³ LORENZO FECCHIO, I Sacri Monti, una realtà fragile, Il giornale dell’ARCHITETTURA, 15 Ottobre 2019.

comprendere il messaggio cristiano. Il bisogno di realismo e di immedesimazione, era, difatti, già vivo nella tradizione monastica medievale.



Figura 16 - Cappella XI, Sacro Monte d'Orta.
Fonte: <http://www.girolando.it/it/il-lago-d-orta/sacro-monte-di-orta>

Da qui l'idea di rappresentare le scene più caratteristiche con statue a misura d'uomo, capelli e barba veri; i personaggi dovevano raffigurare persone realmente esistite, autentiche, con gli sguardi intensi e i volti espressivi [Figura 17]. Il loro compito era di stimolare emozioni in coloro che visitavano le cappelle.



Figura 17 - Statua di San Francesco d'Assisi appartenente al gruppo scultoreo della Cappella XIII del Sacro Monte d'Orta.
Fonte: MARCO BECK PECCOZ.

Il primo esempio di Sacro Monte in Italia fu quello di Varallo, realizzato a partire dal 1486. Dopo il Concilio di Trento del 1535, questo divenne un modello per gli altri Sacri Monti che gli succedettero; lo stesso concilio impose limitazioni specifiche che hanno segnato l'aspetto tipologico e stilistico delle architetture dei diversi siti e, nel contempo, ne hanno reso possibile la salvaguardia fino ai giorni nostri.

Nonostante quindi le diverse influenze culturali e religiose, l'edificato conserva ancora i particolari stili architettonici, le caratteristiche strutturali e i materiali tipici del tempo. I Sacri monti a pianta centrale, con portici per la sosta all'esterno, come disposto da Carlo Borromeo, furono consacrati non solo alla vita di Gesù, ma anche alla passione e alla via Crucis, alla vita di San Francesco, di Maria, al Santo Rosario. Questi luoghi, collegati tra loro da una rete di percorsi, si configurano come un insieme unitario, anche se articolato e complesso [Figura 18].



Figura 18 - Itinerari del "Devoto cammino dei Sacri Monti". Fonte:

<https://www.terranoova.it/News/Ecoturismo/Il-Devoto-Cammino-dei-Sacri-Monti-nasce-una-via-italiana-di-pellegrinaggio>

Sono accomunati da un unico proposito, quello della formazione culturale, paesaggistica e soprattutto spirituale dei visitatori.

Gli elementi che compongono i Sacri Monti, dunque, sono essenzialmente:

- il sito ed il relativo contorno;
- il percorso, materializzato nella strada di accesso e nello spazio che disegna il collegamento tra i punti di sosta e di riflessione dei fedeli;
- l'architettura, ossia i contenitori edilizi di supporto alla sacra rappresentazione, alle funzioni religiose, alla ricettività dei custodi curatori e dei pellegrini.⁴

È percepibile, in definitiva, il forte legame tra i nove Sacri Monti dal punto di vista dell'impianto urbanistico e architettonico, della scelta del sito e della grande rilevanza del paesaggio naturale.

⁴ GIAMPIERO VIGLIANO, Urbanistica, architettura e tutela dei sacri monti, 1° CONVEGNO INTERNAZIONALE SUI SACRI MONTI Varallo, 14 - 20 aprile 1980.

L'UNESCO, nel 2003, ha iscritto nella lista del Patrimonio Mondiale il sito dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia, certificandone il valore universale, come la più alta espressione di un'opera di architettura e di arte sacra in un paesaggio naturale [Figura 19].



Figura 19 - Sacri Monti siti UNESCO dal 2003.

2.1 Il Sacro Monte di Varallo Sesia

Il Sacro Monte di Varallo Sesia, come accennato nel precedente paragrafo, è il più antico dei nove complessi; è situato su uno sperone di roccia, un terrazzamento naturale alle pendici del Monte Tre Croci, sopra l'abitato di Varallo (600 m s.l.m.) [Figura 20].



Figura 20 - Veduta del Sacro Monte di Varallo.

Fonte: <https://tgvercelli.it/presentato-allambasciata-italiana-della-santa-sede-libro-sui-sacri-monti/>

Costituito da una Basilica e quarantacinque cappelle decorate con dipinti murali e popolate da più di ottocento statue a grandezza naturale, è un eccezionale esempio di

luogo votivo. Qui la storia filtra attraverso le architetture, gli spazi, le variazioni stilistiche; ha un'identità artistica, architettonica e urbanistica tra le più caratteristiche dell'arco alpino.

L'architettura delle cappelle, al di là dei suoi contenuti formali, è parte integrante della rappresentazione sacra, che risulta pertanto rafforzata nella sua capacità di trasmissione simbolica. Qui il simbolo, come anticipato, è costituito da una serie di immagini ben definite che interagendo trasmettono il messaggio divino [Figura 21]. Secondo un modello ricorrente anche in altri Sacri Monti, pur nella diversità di impianto e della qualità delle figure, il gruppo statuario, gli sfondi affrescati, gli oggetti architettonici interni alle cappelle formano un tutt'uno con l'esterno della cappella stessa, con la collocazione nello spazio, con l'ambiente attorno, al fine di persuadere il fedele alla consapevolezza dell'atto che sta per compiere.



Figura 21 - Interno Cappella 33, scenografia rappresentante l'“*Ecce Homo*”, nata dalla collaborazione dei fratelli d'Enrico e del Morazzone.

Fonte: <https://www.visitpiemonte.com/it/scultori-di-corte-al-sacro-monte-di-varallo>

L'architetto valesiano Gaudenzio Ferrari fu il vero, grande regista di tutto il complesso, capace di interpretare l'idea francescana e di riportarla in una proposta culturale dal duplice valore: artistico e religioso. L'artista fu anche pittore e scultore di grandi doti, riuscì a portare lo spettatore all'interno della storia attraverso l'uso di strumenti e costumi propri della quotidianità dell'epoca.

L'itinerario che si snoda nel verde e collega tra loro una serie di cappelle, voleva promuovere per i credenti la spiegazione della storia riportata nelle Sacre Scritture; da qui, tipico della spiritualità francescana, il progetto di un cammino devozionale sulle tracce della memoria dei luoghi sacri che doveva essere corredato da immagini

finalizzate ad aiutare il fedele a calarsi in una sorta di immedesimazione nei Vangeli [Figura 22].

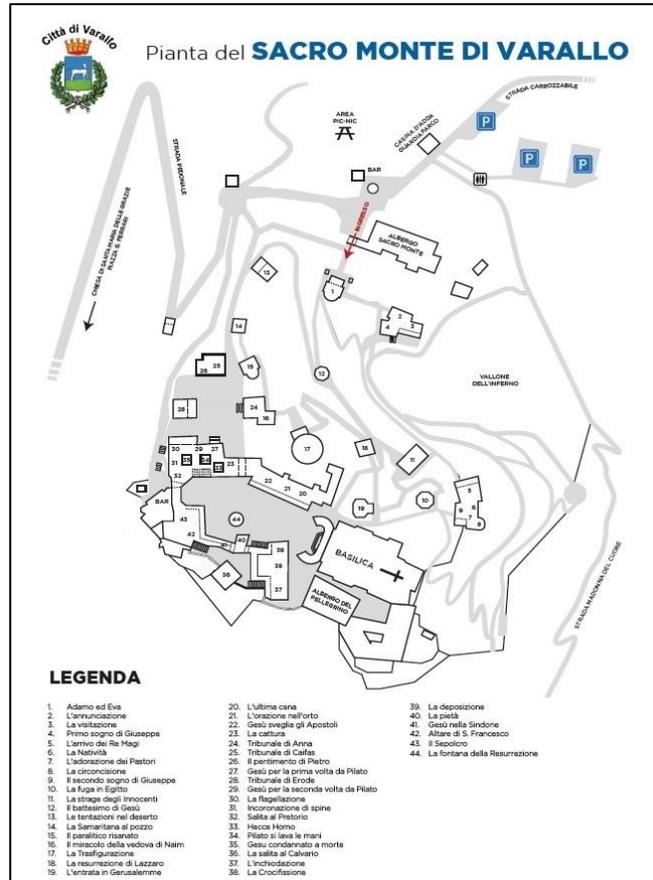


Figura 22 - Mappa del Sacro Monte di Varallo.
Fonte: <http://www.nordcapstudio.it>

Il percorso ha inizio dal complesso di Nazaret e di Betlemme, che sono anche i nuclei più antichi, collocati in una zona ombrosa, tra un bosco di faggi secolari, si trovano in quello che è denominato "il vallone dell'inferno" [Figura 23].



Figura 23 - Complesso di Nazaret (sinistra) e Betlemme (destra).
Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/File:Sacro_Monte_Varallo_2.JPG
Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=1461

Risalendo lungo i pendii del vallone cambia la scenografia, le architetture sono tardo rinascimentali, quindi molto più raffinate; si possono scorgere, tra i più degni di nota, il palazzo del tribunale di Caifa, quello di Anna, di Pilato, di Erode che affacciano direttamente sulla piazza dei Tribunali [Figura 24].



Figura 24 - Piazza dei Tribunali del Sacro Monte di Varallo.

Fonte: <http://malatidimontagna.blogspot.com/2014/04/sacro-monte-di-varallo-la-nuova.html>

La piazza religiosa, ovvero quella della Basilica, è circondata, invece, da edifici appartenenti a diverse epoche [Figura 25].

L'edificio del Sepolcro è del 1491, quelli di Pilato e del Calvario sono riconducibili al periodo a cavallo tra il '500 e il '600.

Di più recente fattura sono, invece, l'albergo del Pellegrino ('700) e la casa Parella ('800). I lavori per la costruzione della Basilica, che rappresenta il punto d'arrivo del percorso ascensionale, hanno avuto inizio nel '600 e sono terminati nell'800.



Figura 25 - Piazza della Basilica del Sacro Monte di Varallo.

Fonte: <http://malatidimontagna.blogspot.com/2014/04/sacro-monte-di-varallo-la-nuova.html>

2.1.1 La storia

Il Sacro Monte fu edificato a partire dal XV secolo per volere di Bernardino Caimi, frate francescano dei Minori Osservanti. Avendo svolto un'intensa attività pastorale e diplomatica in Palestina, egli volle riprodurre i luoghi sacri della vita di Gesù sulle montagne della Val Sesia: la "nuova Gerusalemme".

Il Caimi ottenne dal Pontefice Innocenzo VIII l'approvazione ad accettare importanti donazioni, ciò viene testimoniato da un atto notarile 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.⁵

Ricevute le necessarie autorizzazioni e contando sui buoni rapporti con Ludovico il Moro e sull'appoggio economico dei nobili locali, i quali speravano di incrementare le ricchezze della val Sesia, il frate poté assistere ai lavori iniziali per l'edificazione della chiesa e delle prime cappelle del Sacro Monte.

Verso la fine del '400 risultavano ultimate le cappelle del *Santo Sepolcro*, dell'*Ascensione di Gesù Cristo* e della *Deposizione di Gesù Cristo dalla croce*;

Nonostante la morte del frate nel '500, il programma di edificazione continuò ad avanzare, grazie all'approvazione del Ducato di Milano e anche per la notorietà che il complesso monumentale iniziava ad avere come meta di pellegrinaggi.

Secondo la "Guida dei Misteri del Monte di Varallo", datata 1514, possiamo affermare che all'epoca il Sacro Monte era costituito da ventisette cappelle già terminate, appartenenti ai complessi sacri di Nazareth, Betlemme, del Getsemani, del Calvario, del monte Sion, ecc. Una nota afferma che già in alcune di esse erano presenti raffigurazioni pittoriche atte a semplificare la lettura spirituale delle scene rappresentate.

Dai primi del Cinquecento, fu Gaudenzio Ferrari il principale artista a occuparsi del progetto di padre Caimi. Egli cercò di interpretare il pensiero francescano e di riportarlo nelle diverse rappresentazioni sceniche con estrema naturalezza ed una vena realistica estremamente coinvolgente. Ferrari si occupò dell'impostazione generale del progetto, della decorazione delle cappelle e degli impianti scenici, alternando fondali affrescati a statue a grandezza naturale con volti di personaggi ripresi dalla vita quotidiana.

⁵ DE FILIPPIS, E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009.

L'artista, per le statue, cominciò a usare la terracotta a discapito del legno, richiedendo così manodopera e materiali dalle cave nei dintorni⁶.

Quando Gaudenzio Ferrari lasciò il Sacro Monte, altri artisti si interessarono al progetto, a cominciare dai suoi allievi Bernardino Lanino, Giacomo Paracca, Fermo Stella e i fratelli Giovanni Battista e Giovanni Mauro Della Rovere (detti i Fiamminghini). Questi continuarono gli interventi con lo stesso stile del maestro, senza stravolgerne le sue linee guida [Figura 26].

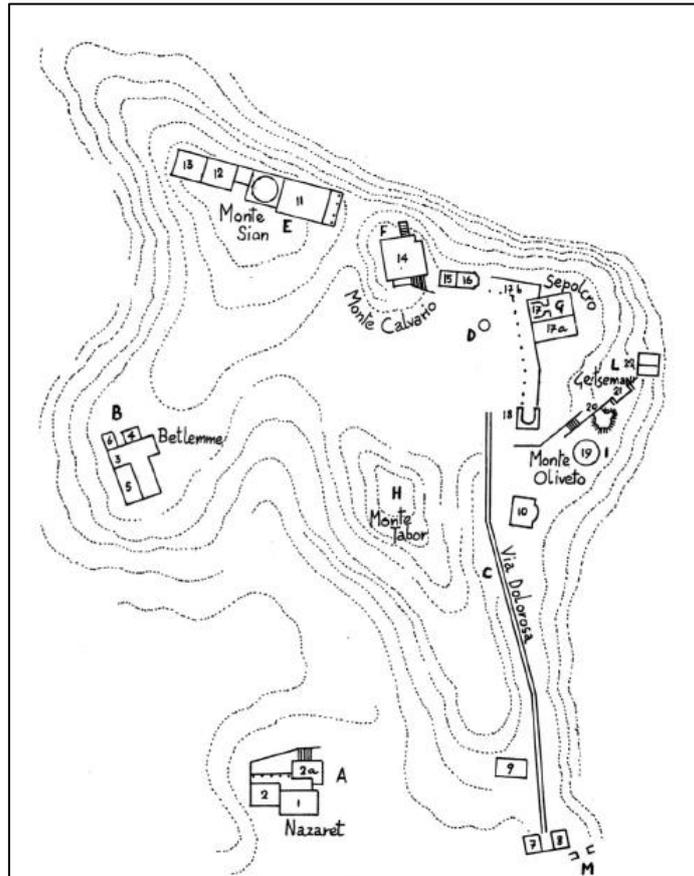


Figura 26 - Pianificazione iniziale del Sacro Monte di Varallo attuata da padre Bernardino Caimi.
Fonte: ALESSI, G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974.

Nella seconda metà del '500, per iniziativa del nobile Gaudenzio d'Adda e della sua sposa, a occuparsi del progetto fu l'architetto Galeazzo Alessi, il quale concepì una nuova disposizione delle cappelle: pensò a una disposizione cronologica, che potesse consentire ai fedeli di seguire le diverse tappe del cammino di Gesù [Figura 27].

L'Alessi verso il 1567-68 stende un nuovo, ambizioso progetto, una pianificazione urbanistica innovativa, le cui operazioni furono descritte nel "Libro dei Misteri".

⁶ MASSONE E. (a cura di), *Sacri Monti in Piemonte, Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994.

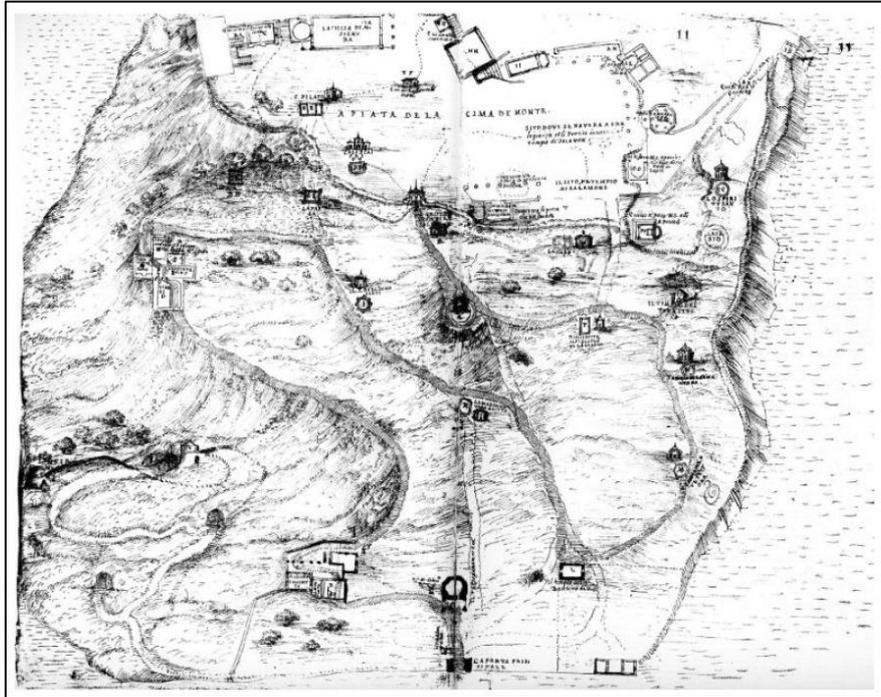


Figura 27 - Progetto di Galeazzo Alessi per il Sacro Monte di Varallo.
Fonte: ALESSI, G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974.

Di questo progetto ne viene realizzato solo una piccola parte di cui la *Porta Maggiore*, le cappelle *Adamo ed Eva*, *La fuga in Egitto*, *La Trasfigurazione*.

L'arcivescovo Borromeo esclude immediatamente l'Alessi perché a suo parere il progetto negava il rapporto tra architettura sacra e simbologia religiosa.

Tra il '500 e il '600 furono installate delle grate lignee a protezione delle scene votive, in modo da preservare le opere degli artisti che fino ad allora erano accessibili ai visitatori.

Il vescovo di Novara, Carlo Bascapè, nel '600 effettua una nuova variazione del progetto originale, si concentra soprattutto alla realizzazione dei Misteri della Passione, qui intervengono anche il noto scultore fiammingo Giovanni Tabacchetti e il pittore Domenico Alfano di Perugia. Il Vescovo, intenzionato a riutilizzare i luoghi del Sacro Monte come mezzo per l'insegnamento delle Sacre scritture, fece riportare all'interno delle cappelle l'esposizione della storia di Gesù Cristo, e fece trascrivere in modo fedele anche i contenuti dei testi Sacri, seguendo tutte le indicazioni date dal Concilio di Trento. Furono realizzate le cappelle *La salita al Calvario* e *Il primo sogno di Giuseppe* oltre a quelle del *Palazzo di Pilato* [Figura 28].



Figura 28 - Apparato scultoreo e affreschi della cappella XXXVI - La salita al calvario.
Fonte: <https://sacromontedivarallo.com/cappella-xxx-la-salita-al-calvario/>

Vennero inoltre progettate *Piazza dei Tribunali*, *Piazza del Tempio* e programmata la costruzione della *Chiesa Maggiore* in sostituzione di quella esistente dalle dimensioni troppo ridotte. Importanti pittori come Morazzone ed Antonio d'Enrico detto il Tanzio da Varallo, il Gherardini, il Gianoli da Campertogno contribuirono ad affrescare i diversi edifici. Terminati il coro e il presbiterio del nuovo tempio nel 1649, il Vescovo Tornielli vi trasporta dalla chiesa antica la statua della Madonna Dormiente.

La seconda parte del Seicento, vede un forte rallentamento dei lavori a causa degli investimenti che si concentrano in particolar modo sul Monte Tabor e sulla nuova chiesa.

Nel 1678 è completato sulla cupola della nuova chiesa lo spettacolare Paradiso con statue del Bussola ed affreschi dei Montalti [Figura 29].



Figura 29 - Il Paradiso della cupola della Basilica dell'Assunta.
Fonte: <https://www.piccolagrandeitalia.tv/files/116.jpg>

Agli inizi del '700 si costruisce il nuovo oratorio presso il Santo Sepolcro, successivamente viene completata la facciata della *Chiesa Maggiore*. L'architetto Morondi progetta e costruisce la *Porta Aurea*, la cripta della *Chiesa Nuova* e l'ultima cappella del *Tribunale di Anna* nella Piazza dei Tribunali.

Il primo marzo del 1707 la Val Sesia passò sotto la giurisdizione dei Savoia, quindi la famiglia affidò all'architetto regio Benedetto Alfieri il compito di redigere il progetto per la tribuna dell'altare maggiore e della cripta che ospita la Madonna dormiente. Nella prima metà del XVIII secolo inizia a svilupparsi la sensibilità nei confronti delle discipline della conservazione e del restauro. Molte, infatti, furono le opere di restauro, di rifacimenti e di nuovi interventi; quelli di maggior rilievo sono relativi alle cappelle di *Cristo al tribunale di Anna* e di *Cristo depresso dalla sindone*, l'*Ospizio* per gli esercizi spirituali con il relativo portico (1770), eretto sul lato sinistro della *Piazza della Basilica*, attorno alla cappella del *Cenacolo*, oggi noto come albergo "Casa del Pellegrino".

Nel frattempo, la cura spirituale del Sacro Monte viene assegnata alla Diocesi di Novara (1765) e dal 1819 a tutt'oggi l'ufficiatura del Santuario viene affidata ai Padri Oblati dei Santi Gaudenzio e Carlo di Novara.

Nell'800 tutto il complesso è stato interessato da continue opere di conservazione e restauro degli edifici, Luigi Cagnola progetta la facciata della *Chiesa Maggiore* e nel 1832 ci fu l'erezione della stessa chiesa a *Basilica*; nuova fattura venne data invece alla costruzione del portico davanti alla cappella 5 relativa all'*Arrivo dei Magi* ed il loggiato davanti alla cappella della *Crocifissione*.

La *Basilica*, ultimata verso la fine del secolo e inaugurata nel 1896, rispetto al progetto originale, presenta la facciata marmorea in stile eclettico, una nuova navata, sei cappelle laterali, la cripta, il coro e il presbiterio [Figura 30].



Figura 30 - Facciata della Basilica dell'Assunta precedente al 1891(a sinistra) e risalente al 1956 (a destra).
Fonte: Sacri monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2010.

Le continue evoluzioni e riprogettazioni, susseguitesi nel corso dei secoli al Sacro Monte, hanno portato alla realizzazione delle sue 45 cappelle, volte a formare una vera e propria cittadella del cattolicesimo [Figura 31].



Figura 31 - Foto aerea delle cappelle del Sacro Monte di Varallo.
Fonte: <https://kalata.it/sacro-monte-di-varallo/>

L'Organizzazione delle Nazioni Unite (UNESCO) ha attribuito un valore inestimabile a quest'ultime, riconoscendo, dal 4 luglio 2003, il Sacro Monte di Varallo quale "Patrimonio dell'Umanità" [Figura 32].



Figura 32 - Targa riconoscimento UNESCO per il Sacro Monte di Varallo, 4 luglio 2003.

2.1.2 Manutenzione e conservazione

Il complesso di Varallo presenta numerosi problemi legati al proprio mantenimento e alla propria manutenzione, in quanto gli ambienti risultano esageratamente articolati e dettagliati, ricchi di sculture lignee e di figure affrescate.

In passato, la direzione delle opere di conservazione, oltre a quella spirituale, al Sacro Monte di Varallo, era di competenza della Diocesi.

Nel corso del '900, però, la gestione e manutenzione viene sempre più trascurata portando il sito a uno stato di abbandono.

Allo scopo di ristabilirne le condizioni ottimali, a partire dal 1980, fu istituita ufficialmente la Riserva Naturale Speciale del Sacro Monte di Varallo, quindi la conservazione e la gestione del sito passa all'Ente regionale.

La definizione "Naturale Speciale", infatti, mette l'accento sul fatto che, oltre alla tutela naturalistica e ambientale, l'Ente gestisce e valorizza anche la ricchezza artistica del Sacro Monte.⁷

I criteri e gli interventi di conservazione e gestione pertinenti all'Ente, sono individuati all'interno di un piano regolatore speciale, il Piano Naturalistico e d'Intervento, strumento di programmazione territoriale e di attività, approvato dal Consiglio Regionale.

Dalla sua istituzione la Riserva Naturale Speciale effettua una serie di interventi manutentivi atti a conservare e valorizzare il patrimonio.

Nello specifico, si occupa della manutenzione ordinaria dei tetti delle cappelle. Almeno due volte l'anno, in primavera e nel tardo autunno, è prevista la pulizia dai detriti vegetali di tetti e canali di gronda per evitare infiltrazioni di acqua nei muri o ristagno sul terreno che potrebbero compromettere la conservazione di affreschi e statue all'interno delle cappelle.

Tale attività risulta essere, anche, un'importante occasione di verifica dello stato conservativo e di stabilità delle coperture e, in generale, dell'intera struttura, permettendo all'occorrenza interventi di manutenzione straordinaria.

Quest'ultimi, che interessano le coperture delle cappelle, sono realizzati da manovalanze locali e qualificate al fine di mantenere la struttura nello stato originale. Le coperture, infatti, sono realizzate posizionando, a gradoni, lastre in pietra tipiche del luogo, le *beole*, al disopra della travatura e di un tavolato ligneo [Figura 33].

Da quanto esposto, è chiaro che la principale causa di degrado del sito è da attribuire all'umidità, favorita dal contesto climatico e ambientale nonché dal dilavamento delle piogge che aggrediscono le zone non coperte e dall'infiltrazione di acqua diretta e per risalita capillare che interessa tetti e involucri esterni.

⁷ http://www.atlvalsesiavercelli.it/riserva_naturale_speciale_del_sacro_monte_di_varallo_ita.php



Figura 33 - Coperture con *beole* del Sacro Monte di Varallo.
Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=8866>

L'umidità comporta danni, talvolta anche irreversibili, sia alle strutture che alle opere che custodiscono.

Al fine di controllare lo stato di quest'ultime, si effettuano monitoraggi, verifiche e, almeno due volte l'anno, operazioni di manutenzione ordinaria, a opera di restauratori.

In ultimo, sono previsti interventi di manutenzione anche per la vegetazione finalizzati al miglioramento complessivo dell'ambiente.

2.1.3 Cappella 17- La Trasfigurazione di Gesù sul Monte Tabor

In questo lavoro di tesi si è posta particolare attenzione all'edificio della Cappella 17 rappresentante *La Trasfigurazione di Gesù sul Monte Tabor* [Figura 34], già esistente nel 1403 in quanto citata nell'atto di donazione ai frati.



Figura 34 - Vista aerea della Cappella 17.
Fonte: <https://www.fratesole.com/2020/05/le-piccole-gerusalemme-evocazioni-di-terra-santa-sul-sacro-monte-di-varallo-sesia/>

Qui sorgeva il tempio dell'*Ascensione*, al cui interno si trovava la riproduzione della *Sacra Orma di Cristo*, oggi visibile in Basilica, e la statua di Gesù, poi spostata prima

al centro della piazza maggiore sopra la fontana, e infine in *Basilica*, presso l'altare di san Pietro d'Alcantara.

L'attuale cappella della Trasfigurazione di Gesù Cristo fu progettata, probabilmente, da Giovanni D'Enrico intorno al 1614, come uno degli edifici più grandiosi e scenografici.

In realtà, due più modesti progetti della stessa sono riportati anche nel “Libro dei Misteri” dell'architetto perugino Galeazzo Alessi. A quest'ultimo è, innanzitutto, attribuito il cambio dell'intero scenario del monte, inizialmente pensato per raffigurare il *Monte Oliveto*, lo spazio viene riconsiderato come il *Monte Tabor*.

I disegni del primo tempio illustravano un edificio circolare con copertura conica e un'alta lanterna racchiudente, all'interno, una cupola semisferica. Nello spazio centrale della cappella era previsto un padiglione vetrato con copertura cupoliforme per contenere il gruppo statuario di solo sei statue. Il secondo progetto, invece, consisteva, in realtà, in un'edicola circolare con cupola, ma priva di lanternino e padiglione vetrato. L'edificio risultava di dimensioni ancora più limitate rispetto al primo, probabilmente al fine di contenerne le spese [Figura 35].

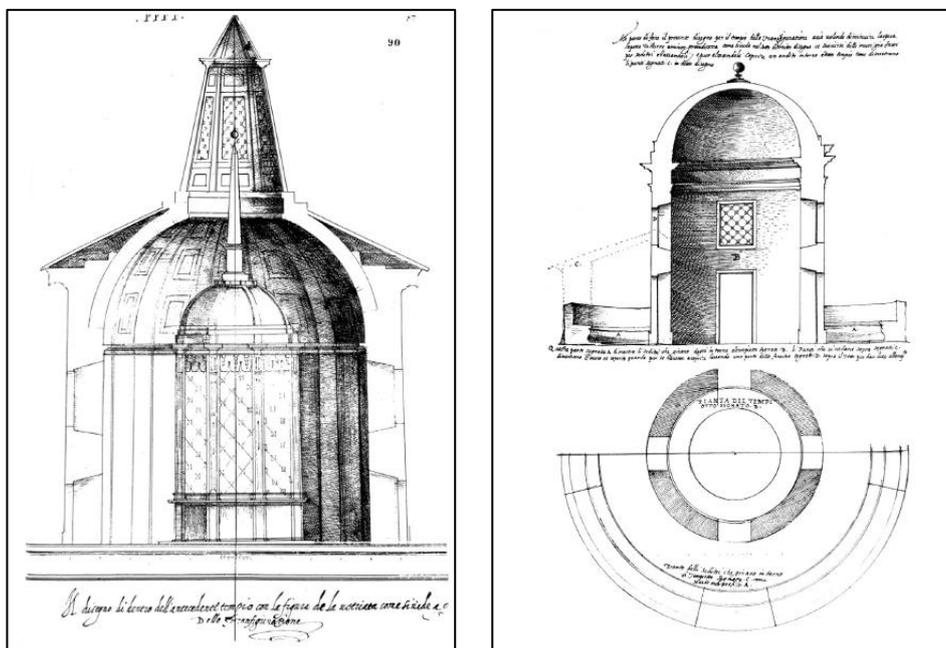


Figura 35 - Primo (sinistra) e secondo (destra) progetto di Galeazzo Alessi contenuti nel Libro dei Misteri.
Fonte: ALESSI, G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974.

I lavori ebbero inizio nel 1572, ma fino al 1630 erano stati realizzati solo bassi muri perimetrali.

Nel piano di ristrutturazione generale del Sacro Monte elaborato da D'Enrico e da Ravelli nel 1614 era compresa anche la cappella della Trasfigurazione.

D'Enrico rendendosi conto della posizione centrale ed emergente del tempio, progettò un imponente edificio a forma di duplice cilindro concentrico terminante con un semplicissimo cornicione e un lanternino. Il lato nord era arricchito da un elegante e ricercato pronao con colonne binate, poste su plinti e reggenti un'ampia volta, coronata dal timpano. Quest'ultimo presentava elementi architettonici in pietra verde scuro, contrastanti con il cromatismo di intonaco e granito, quali il duplice, sottile cornicione sorretto da file di modiglioni.

Nel 1641 la struttura non era giunta al tetto, la costruzione fu ripresa solo nel 1647, mentre si dovette attendere il 1664 per coronare il tutto con la realizzazione della lanterna sulla sommità.

Negli anni a seguire, i fratelli Giovanni e Giuseppe Danesi di Caravaggio affrescano in modo lodevole la cappella, questi straordinari dipinti invitano l'animo del fedele a elevarsi verso il cielo, verso il Padre [Figura 36].

Tra le nubi si possono scorgere angeli che recano cartigli (foglietti) con stinchi di salmi ed altri passi biblici, e reggono due grandi quadri in cui sono rappresentati *La discesa di Mosè dal Sinai con le tavole della Legge* e *L'assunzione di Elia sul carro di fuoco*. Si tratta dei più noti episodi della vita dei due personaggi, che simboleggiano la legge e i profeti, venuti nella nube a testimoniare la missione di Gesù.

La composizione scenica della cappella si ispira alla celebre tela della *Trasfigurazione* realizzata da Raffaello e conservata presso i Musei vaticani a Roma, prospettiva scenografica che sfrutta l'illusionismo barocco e che presenta una teatralità di grande effetto percettivo.



Figura 36 - Interno della cappella 17.

Fonte: <https://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/17/>

Nell'affresco è rappresentato Gesù sul monte, contemplato dai tre discepoli, tra Mosè ed Elia. Questi ultimi personaggi sono stati realizzati nel 1670 dalla mano dello scultore Pietro Francesco Petera di Varallo.

In basso invece è rappresentata una vivace sintesi di alcuni miracoli compiuti da Gesù. I ciechi sulla sinistra, l'ossessa al centro e gli storpi alla destra, con accanto gli altri apostoli, contrapponendo la gloria di Dio alla miseria della condizione umana.

3 Il rilievo del patrimonio culturale

Condizione essenziale per valorizzare e conservare il patrimonio culturale è la profonda conoscenza e completa comprensione dello stesso al fine di poterne individuare tutti i valori da salvaguardare e trasmettere al futuro, dagli aspetti storico-artistici a quelli concernenti caratteristiche di posizione, percezione, morfologia, geometria e cromatismo spesso trascurati ma, in realtà, essenziali per una totale lettura del bene.

In questo processo conoscitivo, che può coinvolgere le più disparate discipline, l'oggetto risulta essere, effettivamente, il principale documento di sé stesso e, in tale ottica, il rilievo si configura proprio quale strumento e mezzo essenziale per estrapolarne, in maniera diretta, il maggior numero di informazioni possibili.

L'estrazione di una grande quantità di dati è inoltre favorita dall'evoluzione tecnologica e metodologica che negli ultimi anni ha investito il campo del rilievo e ne ha potenziato e affinato le tecniche permettendo l'integrazione e la complementarità di strumenti digitali estremamente sofisticati e strumenti tradizionali sempre e comunque efficaci. Congiuntamente, infatti, vecchie e nuove pratiche consentono di definire modelli digitali 3D capaci di sostituire la realtà, ovvero, le cosiddette nuvole di punti definite da A. Saggio come "nuvole di informazioni"⁸.

Tale integrazione si rivela essenziale in contesti di acquisizione di beni culturali come il Sacro Monte di Varallo che necessitano di interventi multi-scala e multi-risoluzione, legati all'esigenza di rilevare oggetti con scale e grado di accuratezza differente, infatti, la stessa permette, superando i limiti di ciascuna tecnica, di ottenere risultati completi in tempi operativi ridotti e a costi vantaggiosi.

Di contro, l'utilizzo congiunto di strumentazioni eterogenee, che spesso operano con precisioni non omogenee e sistemi di riferimento differenti, necessita di un'attenta progettazione del rilievo e un'onerosa elaborazione successiva.

Allo stesso tempo, tuttavia, una seria organizzazione preventiva del rilievo consente, anche, il concepimento dello stesso come un sistema aperto di informazioni visionabile, interrogabile e implementabile nel tempo in funzione di ogni sorta di esigenza.

⁸ A. SAGGIO, *Architettura e modernità. Dal Bauhaus alla rivoluzione informatica*, Roma Carocci 2010.

In questo lavoro di tesi, per l'appunto, ci si è serviti di dati ottenuti da varie campagne di rilievo, avviate a partire dal 2015 e frutto di una collaborazione tra il Politecnico di Torino (Dipartimenti DIATI e DISEG) e l'Ente gestore del Sacro Monte di Varallo. Nel dettaglio, è stato utilizzato il corredo informativo relativo ad acquisizioni del 2015, 2016 e 2017 al fine di generare nuvole di punti georeferite che fossero di supporto alla successiva modellazione tridimensionale e all'implementazione del *database* precedentemente strutturato.

Considerate le caratteristiche architettoniche e urbanistiche del luogo, è stato opportuno operare con tecniche di acquisizione tridimensionale adatte a una scala di dettaglio locale, a tal proposito si riportano, di seguito [Tabella 2], le più opportune, in ambito archeologico e attinenti anche al caso in esame, con riferimento alle diverse scale di rilievo e tipologie di oggetto da rilevare.

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree piccola scala Radar Lidar GPS
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar Lidar <i>Laser scanner</i> TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale GPS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri <i>Laser scanner</i> a triangolazione Sistemi a luce strutturata

Tabella 2 - Schema di metodi di rilievo in funzione di scala e oggetto da rilevare.
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

Per le attività di acquisizione considerate, hanno fatto affidamento, nello specifico, all'uso integrato della tecnica topografica, per mezzo di stazione totale e GPS/GNSS, del rilievo Lidar tramite *laser scanner* e, infine, di quello fotogrammetrico con UAV.

Nei successivi paragrafi si passano in rassegna gli aspetti teorici e operativi relativi alle diverse tecniche impiegate e si entra nel merito degli strumenti di acquisizione adoperati.

3.1 Tecniche di rilevamento

In generale, le tecniche di rilevamento possono essere distinte in due principali classi [Figura 37]:

- Tecniche di rilievo dirette: che consistono essenzialmente in operazioni di misura a diretto contatto con gli oggetti da documentare e i cui valori metrici sono immediatamente verificabili;
- Tecniche di rilievo indirette: che, invece, consistono in operazioni di misura, effettuate per mezzo di strumenti ottici, meccanici e informatici di grande precisione, i cui valori sottoforma di traduzione grafica degli oggetti rilevati si ottengono in seguito a elaborazioni computerizzate.

Inoltre, nell’ambito di quest’ultima classe, a seconda della natura della luce impiegata dagli strumenti per effettuare le misure si distinguono metodi di rilievo:

- Passivi: in cui si utilizza luce naturale. Questo è il caso, ad esempio, della tecnica fotogrammetrica;
- Attivi: in cui la radiazione luminosa viene codificata durante il processo di misura. Questo è il caso della tecnica LIDAR tramite *laser scanner* e di metodi di rilievo che adoperano stazione totale e GPS/GNSS.

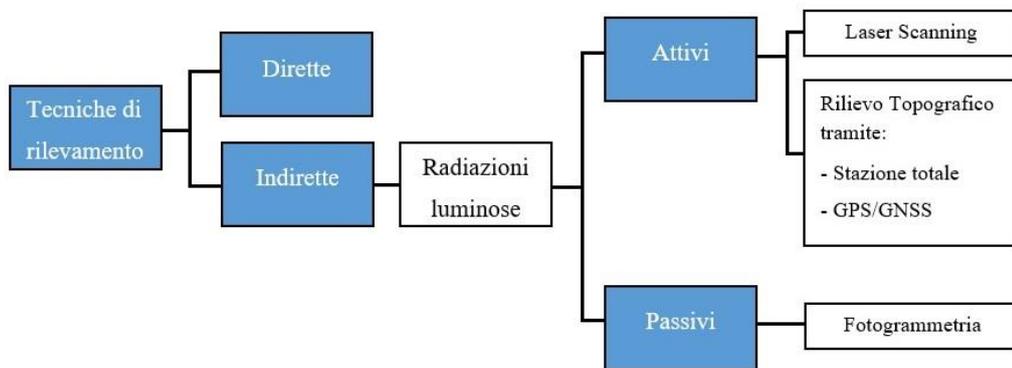


Figura 37 - Schema tecniche di rilievo d’interesse.

3.1.1 Il rilievo topografico

Il rilievo topografico è il complesso delle operazioni di misura e dei procedimenti che occorre effettuare al fine di produrre i fondamenti per la rappresentazione grafica e numerica del territorio⁹.

⁹ CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., Misure, rilievo, progetto, Zanichelli, Bologna, 2012

In linea di principio, le operazioni del rilievo topografico consistono nella determinazione plano-altimetrica di punti rispetto ad altri presi come riferimento, procedendo sempre dal generale al particolare.

Nel dettaglio, l'organizzazione dei lavori di un rilievo topografico è fortemente gerarchica ed è articolata nelle seguenti fasi [Figura 38]:

- Determinazione di una rete di inquadramento (o di appoggio);
- Raffittimento dei punti della rete di inquadramento;
- Determinazione di una rete di dettaglio.

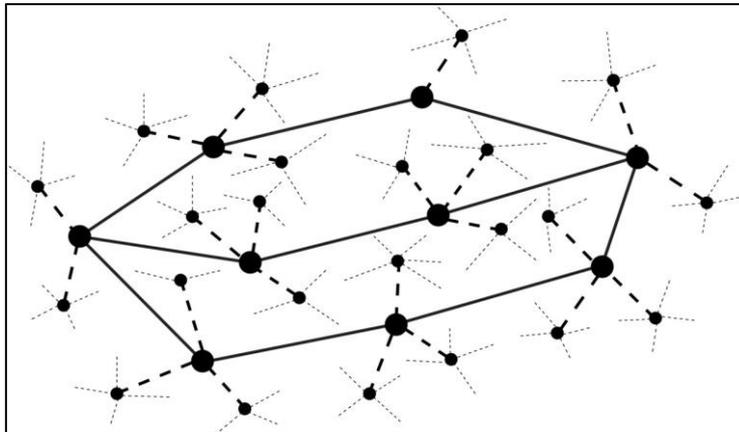


Figura 38 - Esempio di uno schema di copertura di un'area da rilevare. Sono visibili: vertici della rete di inquadramento (punti di dimensione maggiore), vertici della rete di raffittimento (punti di dimensione inferiore) e rete di dettaglio (linee sottili tratteggiate).

Fonte: 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.

È necessario, quindi, in primo luogo, realizzare l'inquadramento geometrico generale dell'area interessata al rilievo determinando una serie di punti, collegati tra loro, che costituiscono l'ossatura, la rete di appoggio delle sottoreti, meglio definita come rete di inquadramento. I punti di questa prima rete devono essere in numero limitato e affetti da una precisione decisamente superiore a quella finale prefissata, in quanto gli errori di misura accidentali relativi agli stessi tendono ad accumularsi su tutto il rilievo e a inficiarne l'affidabilità. La successiva rete di raffittimento individua un secondo livello di punti, collegati tra loro e ai vertici del primo ordine. Questa rete densifica localmente la prima e permette di disporre di vertici noti a distanze convenienti per il rilievo dei conseguenti punti di dettaglio.

In ultimo, i punti di dettaglio integrano il precedente livello e sono in numero largamente superiore a quelli di inquadramento e raffittimento. Non rappresentando la base di nessun altro livello successivo, l'influenza di eventuali errori di misura nella determinazione di questi vertici resta pressoché localizzata, pertanto il rilievo

celerimetrico, condizionato direttamente dalla scala finale, può essere realizzato anche con tecniche meno raffinate e più rapide.

In origine, il rilievo topografico classico veniva applicato essenzialmente per la produzione cartografica, oggi, abbinato al metodo topografico satellitare che utilizza il GPS/GNSS, diventa integrazione per il rilievo fotogrammetrico e per la tecnica LIDAR al fine di georeferire e orientare gli stessi in un sistema di riferimento comune.

Attraverso tale rilievo, infatti, si definisce il sistema di riferimento locale nel quale vengono riportati tutti i prodotti degli interventi di misura.

L'avvento della tecnologia GPS/GNSS, garante di misure estremamente precise, ha implicato notevoli vantaggi, tra cui quello di rendere superflua l'intervisibilità tra i punti da rilevare, in passato fondamentale.

Le reti di inquadramento si rilevano in maniera precisa con la tecnica satellitare GPS/GNSS.

Successivamente, a seconda delle condizioni ambientali (presenza di folta vegetazione o presenza massiccia di edifici), i vertici delle maglie di raffittimento e di dettaglio possono essere determinati utilizzando la tecnologia GPS o la stazione totale, rammentando, in fase di progetto che l'utilizzo di quest'ultima richiede l'intervisibilità tra i punti.

In funzione di esigenze, precisioni, tempi di acquisizione esistono diverse modalità di utilizzo del sistema GPS/GNSS:

- Modalità statica: i ricevitori sono fermi nei vertici per tutta la durata della sessione di misura (normalmente di 45 min -1 h per *baseline* fino a 15 km) e acquisiscono dati contemporaneamente garantendo la massima precisione. Questo metodo, pertanto, è utilizzato per la determinazione dei punti di appoggio;
- Modalità statico-rapida: variante della precedente, si distingue rispetto all'altra per un minor numero di osservazioni e conseguentemente per riduzione dell'accuratezza e del tempo di posizionamento dei ricevitori. Questo metodo, pertanto, è utilizzato per la determinazione dei punti di raffittimento e di dettaglio.
- Modalità pseudo-statica: si tiene fisso uno dei ricevitori (*base*) su un vertice noto e si sposta l'altro (*rover*) in maniera puntuale, sostando per un certo tempo sui punti da determinare. Questo metodo è caratterizzato da una perdita di

accuratezza delle osservazioni ma una maggiore produttività rispetto alle modalità statiche, pertanto è utilizzata per la determinazione dei punti di dettaglio;

- Modalità cinematica continua: metodo simile al precedente ma in questo caso si sposta il ricevitore (rover) con continuità lungo la rete da determinare.

L'acquisizione dei dati tramite rilievo topografico al Sacro Monte di Varallo

L'organizzazione dei rilievi effettuati al Sacro Monte di Varallo, nei diversi anni considerati, ha seguito, in linea di massima, le stesse modalità.

Successivamente alla progettazione delle acquisizioni e, quindi, all'individuazione dei punti costituenti le diverse reti, sono stati determinati i vertici della rete di inquadramento per mezzo della tecnica GPS/GNSS in modalità statica.

Grazie alle stazioni permanenti nazionali GNSS di Domodossola, Gozzano e Biella, si è potuto procedere al rilievo utilizzando un solo ricevitore, posizionato su ciascun punto da rilevare e in grado di registrare i segnali emessi dai satelliti appartenenti ai sistemi GPS, GLONASS e Galileo [Figura 39].

Reperate le monografie, contenenti le coordinate delle stazioni permanenti, dal sito "Spingnss.it" della Regione Piemonte, attraverso il *software LEICA Geo Office 8.4* sono state collegate le tre stazioni con il ricevitore ed in tal modo è stato possibile ottenere le coordinate dei vertici già compensate.

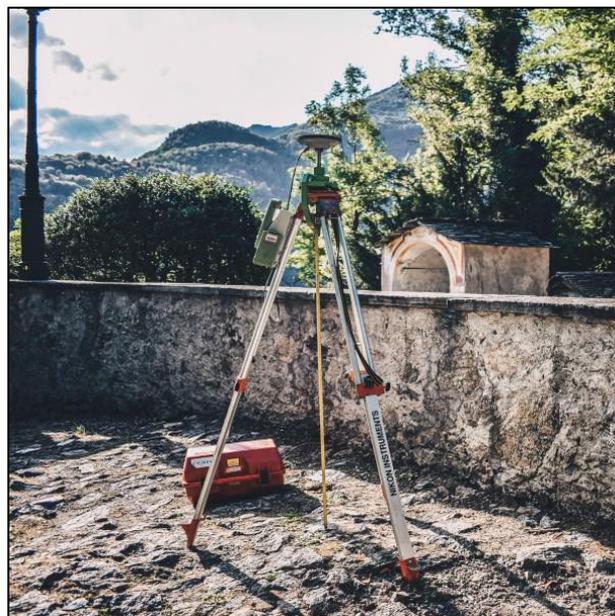


Figura 39 - Messa in stazione del ricevitore GPS/GNSS.

Fonte: 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.

La modalità statica è incentrata sul metodo delle triangolazioni, infatti, la distanza tra ricevitore e satellite rappresenta la base della triangolazione stessa. È possibile risalire a quest'ultima tramite la formula:

$$D_s = t \cdot c$$

Dove:

- D_s è la distanza ricevitore-satellite;
- t è il tempo di propagazione;
- c è la velocità della luce nel vuoto ($2,99 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Il tempo di propagazione, misurabile dal ricevitore, non è altro che il tempo necessario affinché il segnale, di velocità nota, emesso dal satellite raggiunga l'antenna dello strumento.

È da precisare che, per la determinazione delle coordinate X,Y,Z di ciascun vertice, è stato necessario che il dispositivo ricevesse, contemporaneamente, i segnali da almeno quattro satelliti; i segnali trasmessi da tre satelliti hanno consentito di misurare la distanza tra il ricevitore e gli stessi di posizione nota, l'ultimo satellite è stato, invece, necessario per ricavare l'incognita corrispondente alla differenza tra il tempo del satellite e quello del ricevitore, detta *bias* dell'orologio.

Per quel che riguarda la rete di raffittimento del Sacro Monte di Varallo, il rilievo dei vertici è stato condotto con la tecnica topografica classica ovvero utilizzando una stazione totale, la *Leica Nova*, e una palina con prisma [Figura 40].



Figura 40 - Stazione totale Leica Nova Scan Station.

Fonte: 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.

La scelta è stata dettata dal fatto che durante la progettazione del rilievo, i vertici di questa maglia sono stati individuati, solitamente, in posizioni interne a edifici, a ridosso di edifici molto alti o comunque in zone poco “aperte” e non libere da ostacoli entro l’angolo di elevazione necessario al rilevamento tramite GPS/GNSS. Disposta, quindi, la stazione totale in uno dei vertici della rete di inquadramento, di coordinate ormai note e visibile dal punto della maglia di raffittimento da determinare, avvalendosi di una palina con prisma si è proceduto al rilievo.

Nei casi in cui era garantita l’intervisibilità tra un unico vertice di appoggio e più punti della rete di raffittimento, è stata utilizzata la modalità di lavoro *Dynamic Lock* che consente alla stazione totale, dopo una prima misura, l’aggancio, in maniera automatizzata, del prisma in movimento, eliminando la necessità di restare in attesa.

Infine, nell’ultima fase sono state acquisite le coordinate dei punti di dettaglio corrispondenti a spigoli di coperture, punti a terra o punti delle superfici murarie delle cappelle. Quest’ultimi, durante il momento preparatorio al rilievo di individuazione dei vertici delle diverse maglie, sono stati materializzati con i cosiddetti *Marker* o *Target*, segnali, nella maggior parte dei casi, a scacchiera, che possono essere facilmente identificati da elevate distanze [Figura 41].



Figura 41 - Marker sulle superfici murarie e a terra.

Fonte: 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.

Fonte: SANNA S., *Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017.

La semplice identificazione di tali segnali, è stata, infatti, sfruttata per la successiva collocazione delle scansioni *laser scanner* e per la georeferenziazione della nuvola fotogrammetrica.

A grandi linee, il rilievo dei punti di dettaglio è stato effettuato con l’uso della stazione totale, la quale è stata posizionata sui vertici di appoggio e orientata verso i punti da collimare.

Nel rilievo del 2016, invece, oltre alla stazione totale, sono stati utilizzati dei ricevitori GPS, in particolare il *GeoMax Zenith35 Series*, che, in modalità pseudo-statica, o più precisamente *Real Time Kinematic* (RTK), ha permesso di acquisire alcuni dei *Marker* a terra [Figura 42].

Per questo metodo è stato impiegato un ricevitore *base*, collocato su un punto di appoggio, collegato via radio ad un secondo ricevitore, *rover*, itinerante. La *base* ha registrato in modo continuo, istante per istante, le posizioni assunte dal *rover*, permettendo un rilievo in tempo reale. È stato necessario che i due dispositivi ricevessero simultaneamente i segnali di almeno cinque satelliti.

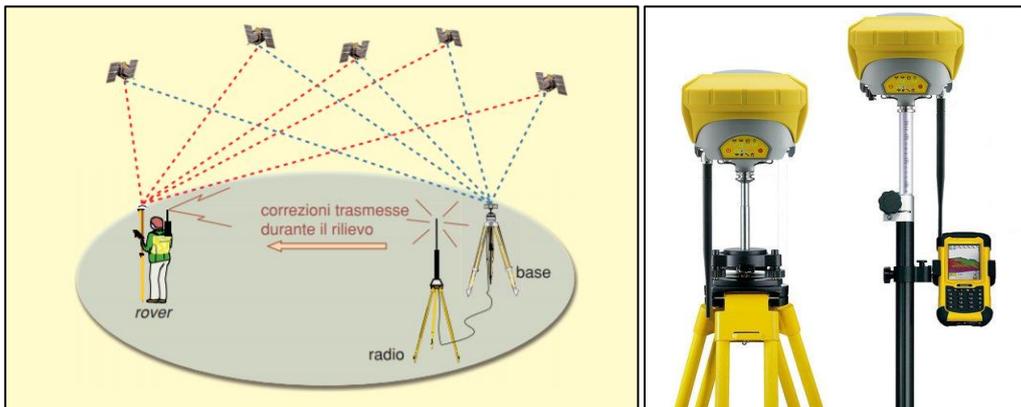


Figura 42 - Schema della modalità di rilievo RTK rover (Sinistra). Rover e base GeoMax Zenith35 Series (Destra).

Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.

Fonte: <https://www.archeodigital.it/>

Durante la fase preparatoria del rilievo, sono stati realizzati gli *eidotipi*, disegni proporzionati degli oggetti, in cui sono rappresentati i *marker* nella corretta collocazione, mentre, in fase di rilievo, gli sono stati attribuiti i relativi codici univoci [Figura 43].

In concomitanza all'acquisizione di tutte le reti, in aggiunta, per ciascun vertice rilevato, sono state redatte le *monografie* contenenti informazioni relative a posizionamento e materializzazione di ogni punto, strumento e sistema di riferimento utilizzato per l'acquisizione [Figura 44].

Entrambi i documenti hanno permesso il riconoscimento dei vertici nelle successive campagne di rilievo e durante l'elaborazione dei dati, compresa quella effettuata in questo lavoro di tesi.

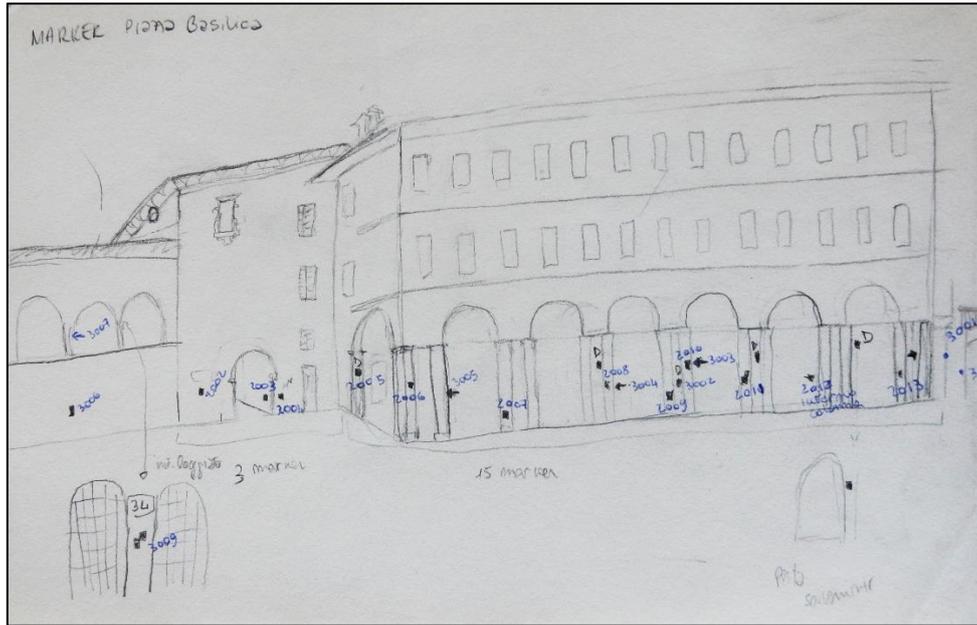


Figura 43 - Esempio di eidotipi realizzati.

Fonte: 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.



Indagini geomatiche

Luogo: Sacro Monte di Varallo, Varallo (VC)

Data: 18-20 Luglio 2016

Codice Monografia: varallo_02

Operatori: Francesca Matrone, Salvatore Ganna

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

VERTICE: 11 000

Localizzazione, immagine generale



Piazza del Tempio, fascia pavimentale



Materializzazione



Tipo di materializzazione: Chiodo

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): Nikon S9900, Franoesca Matrone

Strumento di rilievo: GEOMAX

Altezza strumentale: 167,5 cm

Tipo di antenna: 827964 - Zenith 35 GSM

Data: 18/07/2016

Strumento di misura (uncino/fotella...): rotella

Ora inizio acquisizione: Operatore:

Ora fine acquisizione: Operatore:

Problemi eventuali: Bug del software che non registra le quote

Note: Lavoro: VARALLO

Sistema: UTM WGS84

Figura 44 - Esempio di monografie dei vertici realizzate.

Fonte: 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.

3.1.2 Il rilievo tramite tecnica LIDAR

La tecnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) o *laser scanning* è una tecnica di rilievo speditiva e dall'elevato grado di precisione che si serve di appositi strumenti, noti come *laser scanner*, per ottenere differenti informazioni relative a un elevatissimo numero di punti appartenenti alla superficie esterna di un oggetto.

In generale, il principio di funzionamento dei *laser scanner* si basa, appunto, sul *laser*, ovvero un fascio di luce coerente, ad alta direttività e monocromatico, che lo strumento invia verso l'oggetto da rilevare, variando per passi discreti gli angoli azimutali e zenitali. Il raggio *laser*, colpendo l'oggetto viene in parte riflesso, ritornando alla sorgente che lo ha emesso [Figura 45].

In particolare, grazie a tale raggio e alla relativa quota riflessa, lo strumento è in grado di misurare la distanza dall'oggetto che si intende rilevare.

Tale distanza, insieme alla conoscenza degli angoli, consente di fornire informazioni riguardanti il posizionamento spaziale di ogni punto dell'oggetto e la riflettività della superficie colpita, restituite sottoforma di un modello digitale tridimensionale, ovvero la nuvola di punti.

L'esistenza di *laser scanner* con fotocamera integrata permette, inoltre, durante la fase di elaborazione dei dati, di arricchire le nuvole di punti delle informazioni di colore.

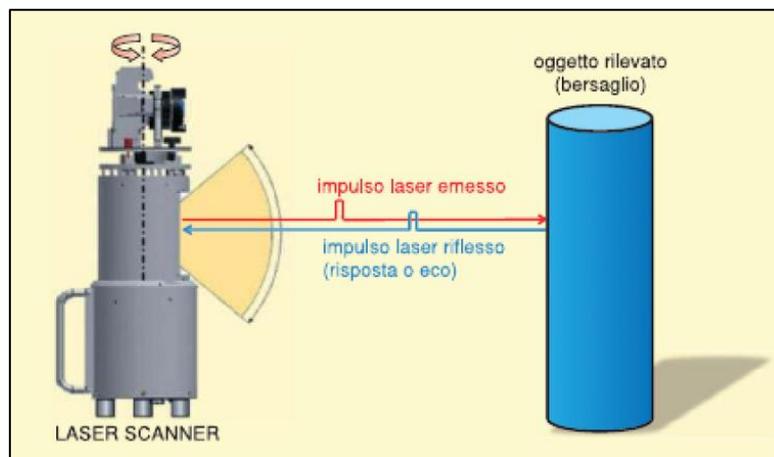


Figura 45 - Schema di funzionamento dei *laser scanner*.

Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.

In base alla tecnologia utilizzata per misurare la distanza è possibile individuare tre diverse tipologie di *laser scanner*:

- a triangolazione ottica: la misura della distanza è effettuata mediante triangolazione, noto l'intervallo tra emettitore e ricevitore del raggio *laser* e gli angoli adiacenti a esso. Questi strumenti sono impiegati, in genere, per il rilievo di oggetti di piccole dimensioni e posti a piccole distanze (fino a 20-30 metri), inoltre sono estremamente precisi [Figura 46];

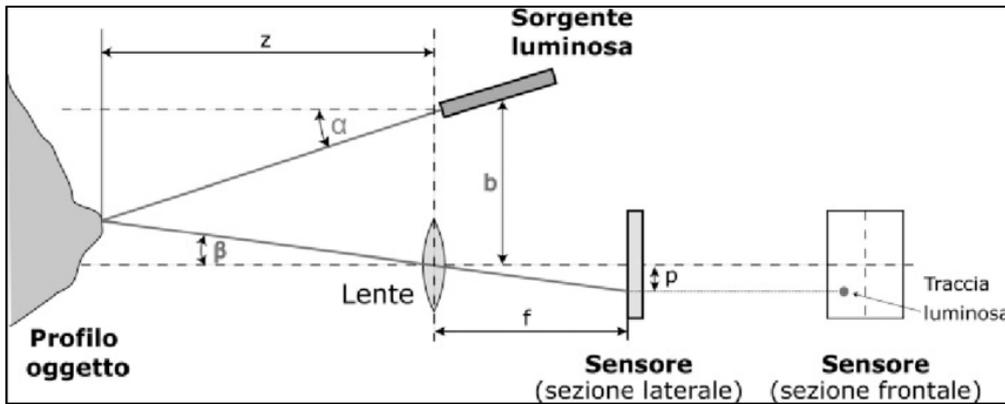


Figura 46 - Schema di principio di un laser scanner a triangolazione ottica.
 Fonte: GUIDI, G.; REMONDINO, F.; RUSSO, M., Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico, in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011.

- a comparazione di fase: la distanza dall'oggetto si ottiene confrontando la fase dell'onda del raggio emesso con quella dell'onda riflessa. La portata varia tra 100 e 300 metri [Figura 47];

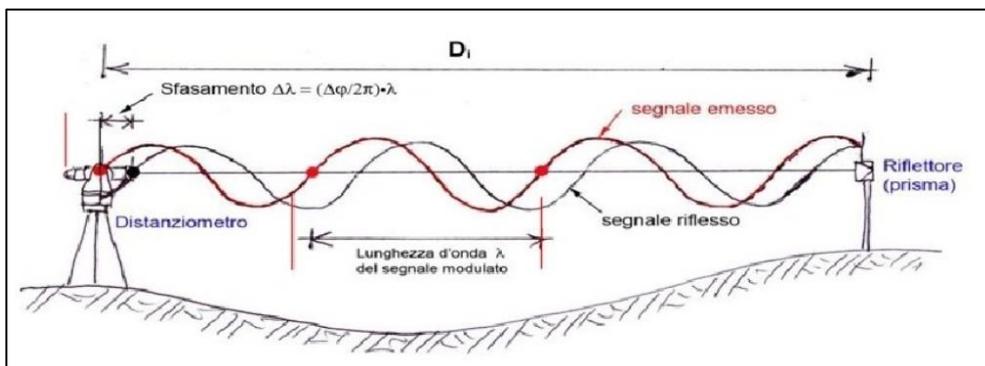


Figura 47 - Schema di principio di un laser scanner a comparazione di fase.
 Fonte: Daniele Bartolucci-Geotop Srl, *Fondamenti di rilievo 3D e strumentazioni Laser*.

- a misura del tempo di volo (TOF, time of flight) indicati anche come LIDAR: la distanza è ottenuta misurando il "tempo di volo" ovvero il tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione di un impulso *laser* (picco di energia elettromagnetica rilasciata in brevissimi intervalli di tempo). La portata può arrivare fino a qualche chilometro [Figura 48].

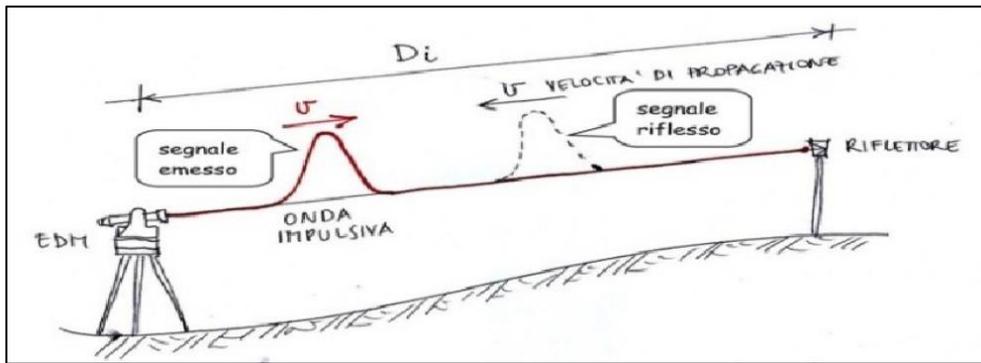


Figura 48 - Schema di principio di un *laser scanner* a misura del tempo di volo (TOF).
Fonte: Daniele Bartolucci-Geotop Srl, *Fondamenti di rilievo 3D e strumentazioni Laser*.

Quest'ultima tipologia è la più utilizzata in contesti topografici e architettonici, come nel caso del Sacro Monte di Varallo.

In generale, i *laser scanner*, sebbene automatizzati, necessitano di un preventivo settaggio dei parametri al fine di ottenere risultati efficienti. Tali impostazioni, che influenzano la durata delle scansioni, riguardano, ad esempio, l'ampiezza della scansione, la qualità, corrispondente al numero di misure effettuate, e la risoluzione che si vuole ottenere dalle scansioni stesse.

Per quel che riguarda la risoluzione, può essere definita come la capacità di rappresentare, nelle scansioni, oggetti dettagliati. Questa caratteristica è strettamente legata alla densità di punti, rappresentativi di una superficie, presenti in ciascuna scansione. È opportuno chiarire che gli impulsi *laser*, emessi dallo strumento, in direzione azimutale e zenitale, generano sulla superficie dell'oggetto da rilevare, una griglia di punti contigui caratterizzata da una certa dimensione di spaziatura tra punti successivi [Figura 49].

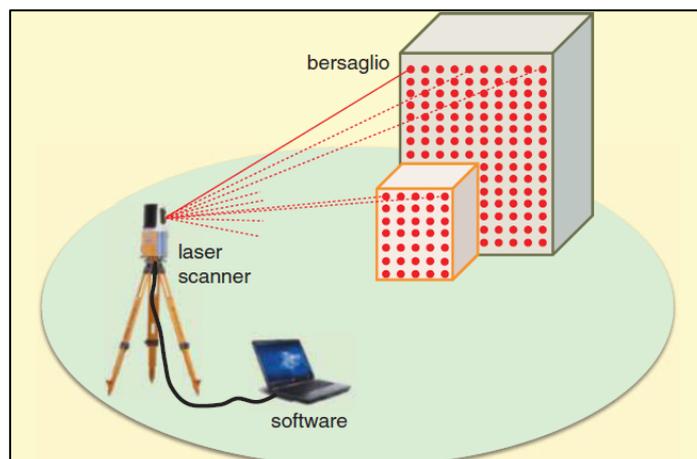


Figura 49 - Maglia regolare di punti generata dagli impulsi *laser*.
Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.

Questa dimensione definisce la densità di punti nella scansione che, a sua volta, influenza la risoluzione intesa quale accuratezza geometrica.

La spaziatura tra i punti dipende dagli angoli, in direzione azimutale e zenitale, degli organi di direzionamento degli impulsi *laser* (componenti, interni allo strumento, che si materializzano con un singolo specchio oscillante o specchi poligonali rotanti) [Figura 50], oltre che dalla distanza tra lo strumento e l'oggetto da rilevare.

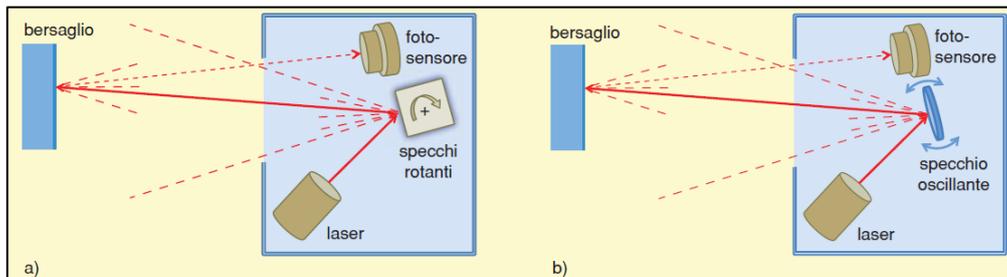


Figura 50 - Schema di funzionamento di specchi poligonali rotanti (a) e di un singolo specchio oscillante (b).
Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., Misure, rilievo, progetto, Zanichelli, Bologna, 2012.

Infatti, a parità di passo angolare di emissione dei raggi *laser*, un oggetto più lontano dal punto di presa sarà descritto con una griglia di punti caratterizzata da una spaziatura più grande rispetto a un oggetto più vicino e quindi da una densità di punti minore [Figura 51].

Per cui, in un rilievo, dopo aver definito il punto di stazione del *laser scanner*, è necessario, prima dell'acquisizione, in base alla distanza dello strumento dall'oggetto da rilevare, scegliere il passo di emissione del *laser* in modo che tutte le scansioni abbiano una risoluzione il più omogenea possibile.

La progettazione dei punti di presa è una delle operazioni chiave, assolutamente non trascurabile per un rilievo lidar completo.

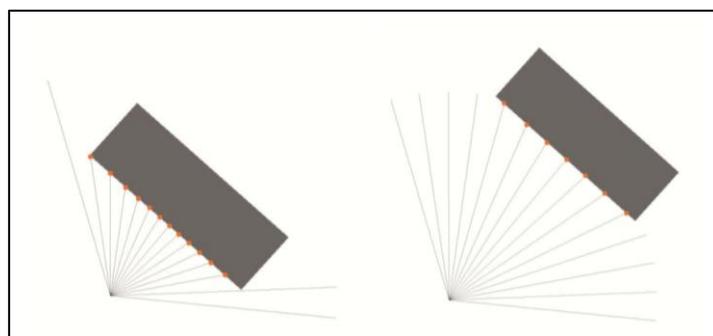


Figura 51 - Variazione della maglia di punti in funzione della distanza.
Fonte: http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/DispensaGeCo_SistemiScansione3D_dic2011.pdf

Per pianificare le posizioni di acquisizione, in genere, si tiene conto delle caratteristiche formali e dimensionali dell'area di rilievo e delle necessità essenziali per la successiva elaborazione delle scansioni.

Nel dettaglio, bisogna individuare le posizioni più adatte al fine di evitare mancanza di dati causate, ad esempio, da ostacoli lungo la traiettoria dei raggi *laser* o, ancora, acquisizione di punti falsi a causa della distribuzione di un singolo raggio *laser* su superfici a distanza differente dallo strumento [Figura 52].

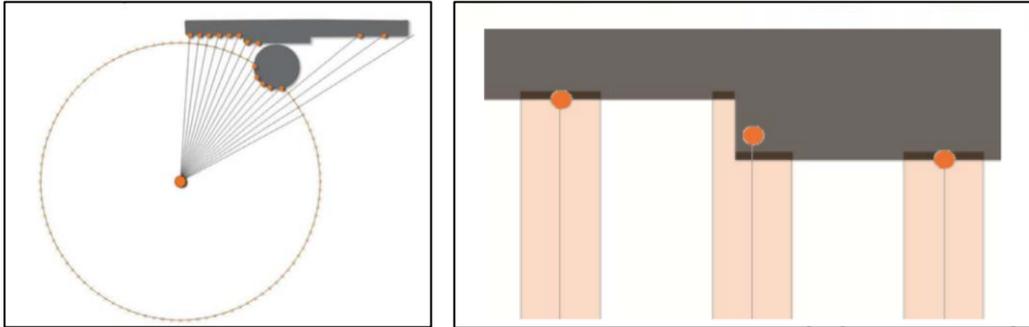


Figura 52 - Esempi di mancanza e falsificazione di dati.

Fonte: http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/DispensaGeCo_SistemiScansione3D_dic2011.pdf

Inoltre, è da considerare che per una restituzione ottimale conviene che l'acquisizione avvenga in vista nadirale cercando di non incorrere in prese di superfici troppo estese caratterizzate da qualità di dati inferiore.

In base alla tipologia di elemento che si vuole rilevare, quali spazi interni, oggetti con dimensioni trascurabili rispetto alle altre o oggetti a tutto tondo, è buona norma spostare lo strumento, tra una ripresa e la successiva, parallelamente alle superfici o attorno a esse garantendo un sufficiente grado di sovrapposizione tra le scansioni [Figura 53].

La zona di sovrapposizione, oltre ad assicurare la completezza del rilievo, può essere di ausilio nella successiva elaborazione dei dati, in quanto permette l'adeguata unione delle scansioni senza l'uso dei *Target*.

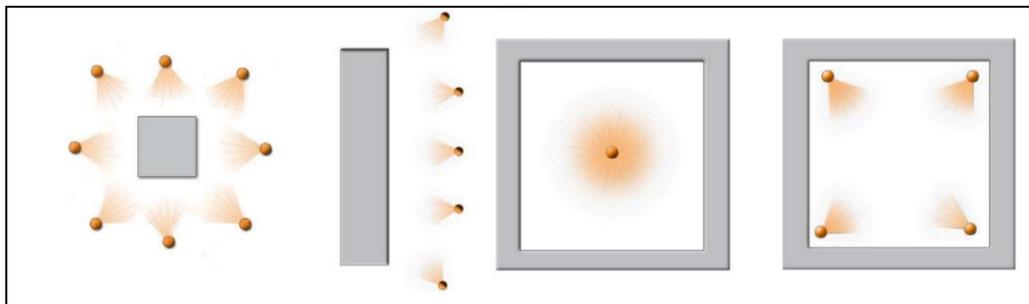


Figura 53 - schemi modello di posizionamento del laser scanner.

Fonte: http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/DispensaGeCo_SistemiScansione3D_dic2011.pdf

Infine, anche per il rilievo tramite Lidar, risulta fondamentale codificare i punti di scansione e i target acquisiti in ciascuna ripresa, annotandoli in *eidotipi* di supporto per l'elaborazione o un eventuale riutilizzo dei dati.

L'acquisizione dei dati tramite tecnica LIDAR al Sacro Monte di Varallo

Le campagne di rilevamento effettuate tramite tecnica LIDAR al Sacro Monte di Varallo e considerate in questo lavoro di tesi, sono avvenute nello stesso giorno o nel giorno a seguire del rilievo topografico, quindi, dopo una già completa conoscenza delle caratteristiche formali e dimensionali dell'area. Ciò ha agevolato la scelta dello strumento da utilizzare e dei punti di stazionamento dello stesso. In particolare, sono stati adoperati da uno a due strumenti *laser scanner* FARO CAM 2 [Figura 54] di cui sono di seguito riportate le caratteristiche [Tabella 3].



Figura 54 - Laser scanner FARO CAM 2.

Fonte: 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.

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

Tabella 3 - Caratteristiche *laser scanner* FARO CAM 2.

Tale strumento consente l'acquisizione autonoma di numerose informazioni quali posizione spaziale, riflettività e cromatismo delle superfici, considerata la presenza di una fotocamera integrata. La dotazione di un *touch-screen* e del *software Focus 3D* ha semplificato l'operazione di messa in stazione, tramite la livella sferica digitale installata al suo interno, e di settaggio dei parametri, quali risoluzione, qualità e area effettiva delle scansioni.

Nel dettaglio, sono stati impostati una risoluzione di 1/5 e una qualità di 4x, caratteristiche che hanno consentito una durata di scansione di circa 10 minuti [Figura 55].

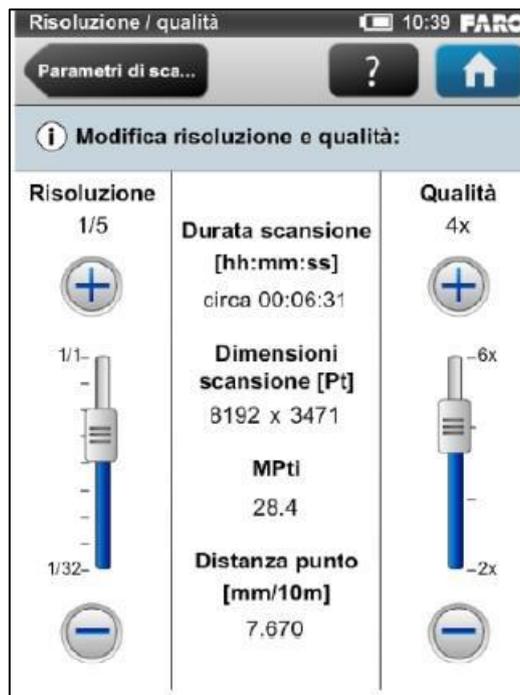


Figura 55 - Display dello strumento per il settaggio dei parametri di scansione.

Fonte: 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, 2015.

È da sottolineare che il parametro risoluzione è stato tenuto inalterato per le intere campagne di rilevamento ma si è comunque garantita una omogeneità tra le diverse scansioni mantenendo una distanza media tra la posizione dello strumento e gli oggetti da rilevare.

Per quel che riguarda la posizione di stazionamento, è stata seguita la buona prassi di un rilievo LIDAR, precedentemente descritta, sia per l'acquisizione delle scansioni all'esterno che per quelle interne alle cappelle.

In aggiunta, sono stati realizzati gli eidotipi contenenti i punti di scansione codificati e i *Target* ripresi, ampiamente consultati nella presente tesi.

Si riporta di seguito una planimetria, fuori scala, relativa ai punti di stazione, divisi per differenti campagne di rilievo, da cui sono state acquisite le scansioni adoperate in questo lavoro [Figura 56].

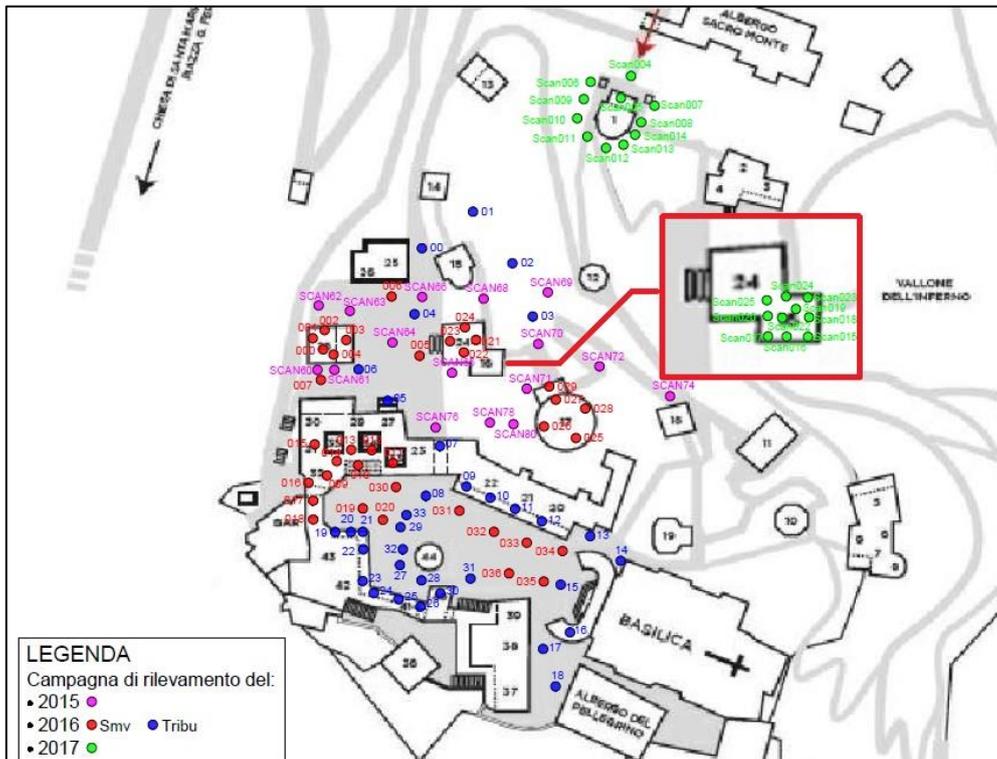


Figura 56 - Planimetria fuori scala relativa ai punti di stazione.

3.1.3 Rilievo fotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico digitale ha assunto un ruolo rilevante nel campo dei Beni Culturali in quanto rappresenta una tecnica di acquisizione rapida, affidabile, economica e in grado di fornire una grande quantità di dati, pur non richiedendo il contatto diretto con l'oggetto. La stessa, infatti, permette di ottenere informazioni metriche, morfologiche, cromatiche e di posizione degli oggetti ripresi e dell'ambiente che li circondano, graficizzate sottoforma di una nuvola di punti densa. Fondamentalmente, i principi che governano questa tecnica si rifanno alla fotogrammetria classica tant'è che l'*output* risulta essere un modello tridimensionale partendo, ancora, da almeno due fotogrammi bidimensionali, nient'altro che immagini impiegate a fini metrici. I fotogrammi possono essere considerati prospettive centrali della realtà su cui è possibile eseguire misure di precisione per ottenerne informazioni. Conoscendo l'esatta posizione delle proiezioni di un oggetto su almeno due

fotogrammi, i punti di presa e la posizione spaziale di quest'ultimi, il punto reale risulta definito dall'intersezione dei raggi proiettanti che congiungono i punti omologhi sui fotogrammi con i relativi centri di presa [Figura 57]. Analiticamente, questo concetto si traduce con la risoluzione delle cosiddette equazioni di collinearità.

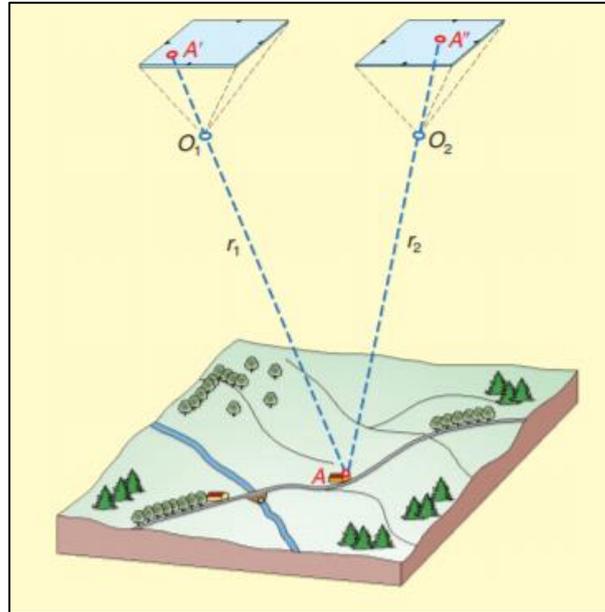


Figura 57 - Definizione di un punto della realtà e principio di collinearità.

Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.

La differenza principale tra le due tecniche, ovviamente, è l'immagine; quelle digitali, infatti, sono immagini numeriche organizzate in una matrice di *pixel* dalle variabili spaziali ben definite [Figura 58].

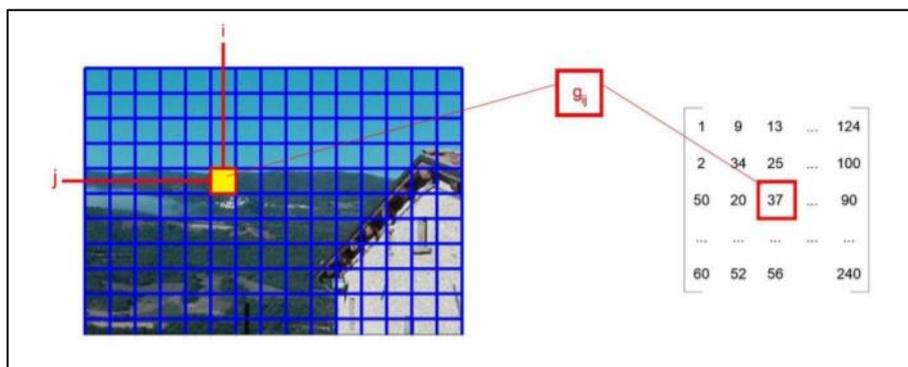


Figura 58 - Immagine digitale e matrice di *pixel*.

Fonte: LINGUA A. *Dispense di Cartografia numerica e GIS: Fotogrammetria*

L'acquisizione delle immagini avviene adoperando svariate tipologie di camere, quali le più comuni compatte fino alle *reflex* professionali, che si differenziano per stabilità, costo, tipo di sensore (CCD o CMOS) e di ottica.

In aggiunta, lo sviluppo di calcolatori in grado di gestire un'enorme mole di dati e di *software* che implementano gli algoritmi di *Structure from Motion* hanno permesso lo sviluppo della fotogrammetria digitale non convenzionale che rivoluziona tutta l'organizzazione della classica fotogrammetria, rendendo la fase di acquisizione più rapida e flessibile e automatizzando le ultime fasi di orientamento e restituzione.

Nel dettaglio, la rapidità e flessibilità, in fase di presa, sono garantite dalla possibilità di assi delle camere convergenti, al contrario della classica fotogrammetria che necessita di prese normali per l'osservazione stereoscopica [Figura 59].

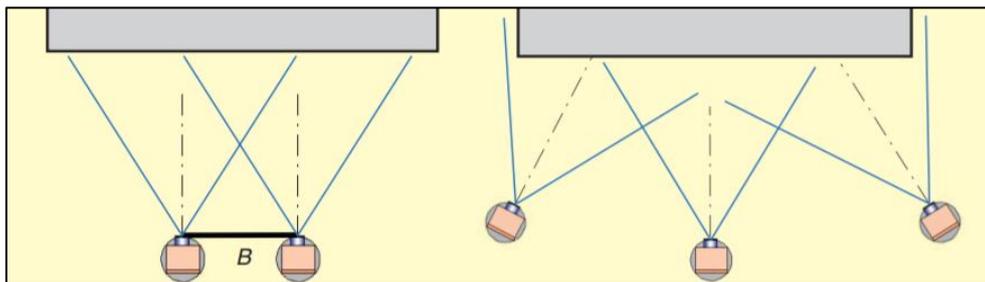


Figura 59 - Schema di prese normali (Sinistra) e prese convergenti (destra).

Fonte: CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.

Le ultime due fasi, invece, vengono risolte dalla *Structure from Motion*, ovvero, una tecnica di calcolo che, pur basandosi sui principi teorici della fotogrammetria classica (collinearità, intersezione dei raggi proiettivi, calibrazione della camera), implementa gli algoritmi della *Computer Vision*, permettendo, meccanicamente, di ricostruire la geometria di presa, correlare le immagini digitali ed elaborare la nuvola di punti.

È comunque da sottolineare che per la georeferenziazione della nuvola fotogrammetrica, per mezzo dei *software*, è necessario, almeno in prima istanza, basarsi sui dati del rilievo topografico.

Ulteriore innovazione nell'ambito della fotogrammetria aerea, risulta essere l'utilizzo degli UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo.

Tali apparecchi permettono di beneficiare di un rilievo a costi contenuti e dall'elevata affidabilità, dovuto alla possibilità di adoperare camere digitali compatte ad alta risoluzione e ridurre la quota di volo rispetto ai tradizionali rilievi fotogrammetrici aerei. Gli ambiti di applicazione sono tra i più disparati, quali il settore archeologico, paesaggistico e architettonico. In funzione di quest'ultimi, l'*Unmanned Vehicle*

Systems International Association, li classifica in tre categorie principali: *Tactic*, *Strategic* e *Special Purpose* [Tabella 4].

<i>Tactic</i> UAV Sottocategorie	Acronimo	Capacità di volo [km]	Max quota di Volo raggiungibile [m]	Autonomia [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 Endurance</i>	LALE	>500	3000	>24	< 30
<i>Medium Altitude Long Endurance</i>	MALE	>500	14000	24-48	1500

Tabella 4 - Classificazione degli UAV *Tactic* a cura della *Unmanned Vehicle Systems International Association*.

Fonte: CHIABRANDO, F.; LINGUA, A. M.; MASCHIO, P.; RINAUDO, F.; SPANÒ, 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.

In campo architettonico, si è soliti utilizzare strumenti appartenenti al primo gruppo e nel dettaglio:

- *Micro* UAV, con dimensioni dai 30 ai 50 cm e caratterizzati da ridotte velocità che gli consentono condizioni di volo stazionario;
- *Mini* UAV o MUAV con dimensioni dai 50 ai 100 cm, peso non superiore ai 20 kg e raggio d'azione fino ai 10-15 km di distanza. Solitamente lanciati a mano, si scindono in ala fissa o rotante.

Acquisizione dei dati tramite UAV al Sacro Monte di Varallo

L'acquisizione dei dati per il rilievo fotogrammetrico al Sacro Mone di Varallo è avvenuta utilizzando un UAV esarotore, a pilotaggio remoto, realizzato dal DIATI del Politecnico di Torino e chiamato Valis DIATI PX01 [Figura 60]. La struttura è costituita da un telaio in fibra di carbonio, plastica e alluminio e sei bracci alle cui estremità sono montate 6 eliche rotanti collegate a dei motori *brushless* per il controllo della velocità.

L'esacoetero ha una autonomia di circa 30 minuti e una capacità massima di carico sugli 800 grammi.

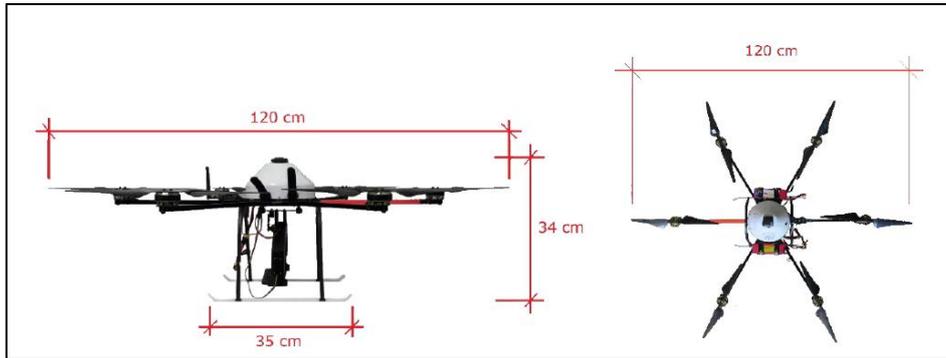


Figura 60 - Esacoetero Valis DIATI PX01.
Fonte: Politecnico di Torino, DIATI, Manuale di volo.

Sul drone è stata posizionata una fotocamera SONY nex 5 con obiettivo ortogonale al terreno per l'acquisizione nadirale [Figura 61].



Figura 61 - Fotocamera SONY nex 5.
Fonte: <https://www.fotografidigitali.it/>

Consiste in una *mirrorless* dalle dimensioni del corpo ridotte ed estremamente leggera, ma la cui lunghezza focale è paragonabile a quella base di una *reflex*. Ulteriori caratteristiche della camera sono riportate nella [Tabella 5].

L'automazione della tecnica di fotogrammetria digitale non ha, comunque, esonerato da un progetto della presa dei fotogrammi per un risultato ottimale delle acquisizioni e per una più semplice gestione successiva dell'enorme quantità di dati.

Come accennato, nonostante con tale tecnica non sia necessario avere assi di presa nadirali, nell'acquisizione in campo si è optato, ugualmente, per riprese di questo genere.

Tipo	Fotocamera <i>mirrorless</i> a ottiche intercambiabili <i>Compact System Camera</i>
Sensore	CMOS APS-C (23,4x15,6 mm)
Pixel Totali	Circa 14,6
Pixel effettivi	Circa 14,2
Sensibilità	ISO 200-12800
Stabilizzatore	Integrato in alcuni obiettivi
Autofocus	Sistema AF a contrasto
Illuminatore AF	Integrato a LED
Sistema di lettura esposimetrica	Misurazione di 49 segmenti da parte del sensore di immagine
Compensazione dell'esposizione	+/- 2 EV con 1/3 EV passi
Bracketing AE	Con incrementi 1/3 EV 2/3 EV, 3 fotogrammi
Otturatore	A controllo elettronico, a traslazione verticale, su piano focale
Tempo di otturazione	1/4000-30 sec. e posa B
Velocità <i>Synchro Flash</i>	1/160 sec.
Flash	Opzionale esterno-GN 7
Mirino	NO
Live-view	Sì
Schermo	<i>Display LCD TruBlack- 3"</i>
Numero totale punti	921.600
Schermo snodato	Sì-inclinabile in alto e in basso
Scatto a raffica	7 fps in modalità continua con priorità alla velocità JPEG (formato grande, modalità Fine): 16/14 immagini RAW: 7 immagini RAW+JPEG: 7 immagini
Supporti di registrazione	<i>Memory Stick PRO Duo, Memory Stick PRO-HG Duo</i> Schede di memoria SD/SDHC/SDXC
Dimensione Immagine JPEG	4592x3056(14M) 3344x2224 (7,4M) 2288x1520 (3,5 M) Panorama:12.416x1.856 (226°/201°)/ 8.192x1.856 (149°/133°)/ 5.536x2.160 (151°/135°) / 3.872x2.160 (106°/94°)
Riduzione rumore esposizione lunga	Attiva/disattiva, disponibile quando la velocità dell'otturatore supera 1 secondo
Riduzione rumore ISO elevata	Sì (Auto/debole)
Spazio colore	<i>sRGB – AdobeRGB</i>
Connettori	<i>Mini connettore HDMI ® (tipo C)</i> <i>USB 2.0 Hi-Speed</i>
Batteria	NP-FW50
Peso	229 grammi
Dimensioni	111x59x38 mm
Distanza Focale	16 mm

Tabella 5 - Caratteristiche fotocamera SONY nex5.

Al fine di ottenere prodotti dal contenuto metrico estremamente preciso, dopo aver valutato le caratteristiche dell'area da rilevare e, di conseguenza, individuato gli strumenti da impiegare, è stato scelto di effettuare le acquisizioni tramite strisciate rettilinee, caratterizzate da un ricoprimento longitudinale dell'80% e un ricoprimento trasversale del 60-70%.

Note, dunque, le caratteristiche della camera, tra cui la lunghezza focale e la scala di rappresentazione finale è stata definita un'altezza di volo, ovvero la distanza media tra drone e terreno, pari a 50 m.

L'altezza di volo ha permesso di definire anche il parametro della GSD (*Ground Sample Distance*) che indica la distanza tra il centro di due *pixel* consecutivi e delinea la quantità di terreno rappresentata in un *pixel*, quindi, la precisione effettivamente adottata nel rilievo. L'accettabilità della GSD è stata valutata confrontandola con una GSD_{max} di progetto, calcolata come la metà della precisione della scala di rappresentazione finale.

In ultimo, la velocità dell'esacoptero è stata mantenuta pari all'incirca a 2-3 m/s per evitare inconvenienti relativi al trascinamento delle immagini, deformazione provocata dal movimento durante la presa e dalla non istantanea chiusura dell'otturatore.

Nelle immagini a seguire [Figura 62 e Figura 63] si riportano le simulazioni dei piani di volo per i due voli nadirali incrociati ottenute con il *software open source MissionPlanner*. Dopo aver individuato l'area da sorvolare nella schermata *Flight Planner* è stata selezionata la camera utilizzata e impostati i dati relativi ad altezza di volo, velocità del velivolo e ricoprimento longitudinale e trasversale.

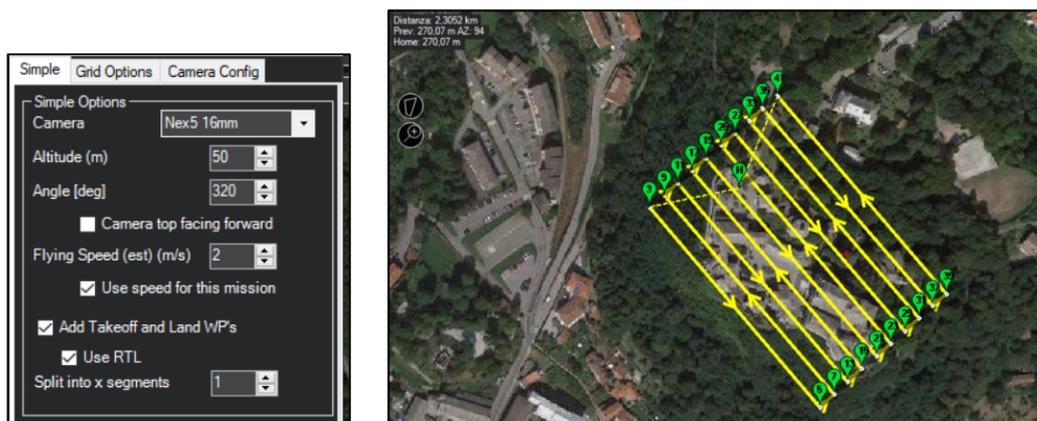


Figura 62 – Piano di volo nadirale ed impostazioni.

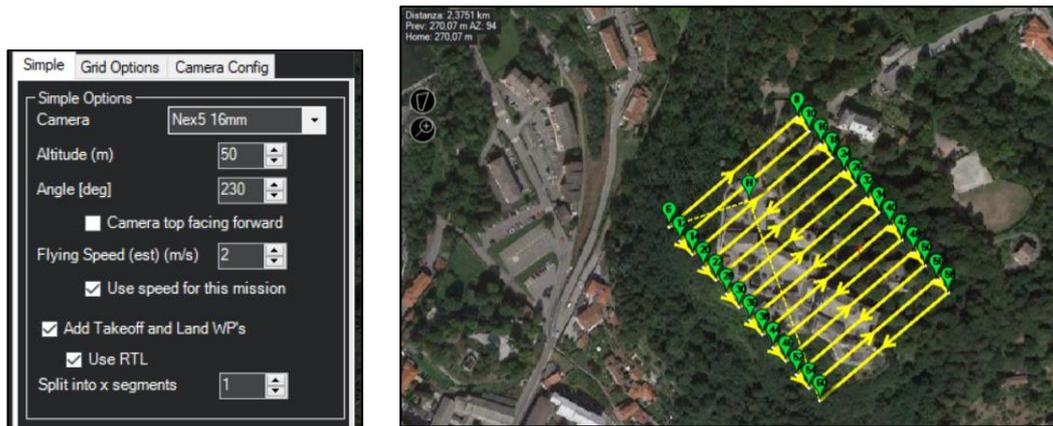


Figura 63 – Piano di volo nadirale ed impostazioni.

Come da progettazione di volo, è stato, dunque, acquisito il set di fotogrammi utile all'elaborazione successiva.

4 Elaborazione dei dati

I dati ottenuti dal rilievo topografico, LIDAR e fotogrammetrico necessitano di elaborazioni successive al fine di ottenere prodotti, quali nuvole *laser scanner* e nuvole fotogrammetriche, opportunamente georeferiti e relativi ai soli elementi di interesse.

Contrariamente a quanto accade per il rilievo topografico tradizionale, infatti, con le tecniche LIDAR e fotogrammetriche, durante la fase di acquisizione, non si effettua una cernita dei dati, ma vengono rilevati senza distinzioni, in modo da semplificare le operazioni di acquisizione. Questo approccio, tuttavia, obbliga a una successiva fase di elaborazione, caratterizzata, in base ai risultati prefissi, anche da tempi molto lunghi.

Nel presente lavoro di tesi, ci si è concentrati sulla procedura di restituzione di dati acquisiti tramite rilievo LIDAR, ma, al fine di generare una nuvola di punti utile alle successive operazioni, è stato necessario usufruire anche dei prodotti ottenuti dal processamento dei rilievi topografici e fotogrammetrici.

Ragion per cui, nei seguenti paragrafi, ci si limiterà alla descrizione dei soli procedimenti teorici per le elaborazioni non effettuate direttamente, al contrario, è dettagliatamente esposto l'iter, i *software* utilizzati e i parametri inseriti, per la restituzione della nuvola da *laser scanner*.

4.1 Elaborazione dei dati acquisiti dal rilievo topografico

Le coordinate dei vertici rilevati tramite stazione totale e strumenti GPS/GNSS, fanno riferimento al datum WGS84 e sono coordinate ellissoidiche ovvero costituite da Latitudine, Longitudine e Quota Ellissoidica.

È stato, dunque, necessario convertire il dato altimetrico riferendolo al geoide, superficie equipotenziale che rappresenta in modo più accurato la forma della Terra rispetto a un ellissoide.

La Quota Ellissoidica, allora, è stata trasformata nella relativa Quota Ortometrica o Geodica che esprime l'altezza di un punto rispetto al livello medio del mare.

Successivamente tramite il *software StarNet*, che ricorre al metodo statistico dei minimi quadrati, è stata effettuata la compensazione della rete topografica, ovvero corrette le coordinate di ciascun vertice tenendo conto della propagazione degli errori.

Il *software* restituisce il disegno della rete con relative ellissi d'errore e il *file* delle coordinate compensate di tutti i punti acquisiti con il rilievo topografico.

Quest'ultimo *file* è stato essenziale per la localizzazione spaziale, ossia, la georeferenziazione, delle nuvole da *laser scanner* e fotogrammetrica.

A titolo di esempio si riporta la rete topografica con relative ellissi di errore e uno stralcio del *file* delle coordinate compensate dei vertici con gli attinenti scarti quadratici medi inerenti alla campagna di rilevamento del 2016, i cui dati sono stati quelli maggiormente utilizzati in questo lavoro di tesi [Figura 64 e Tabella 6].

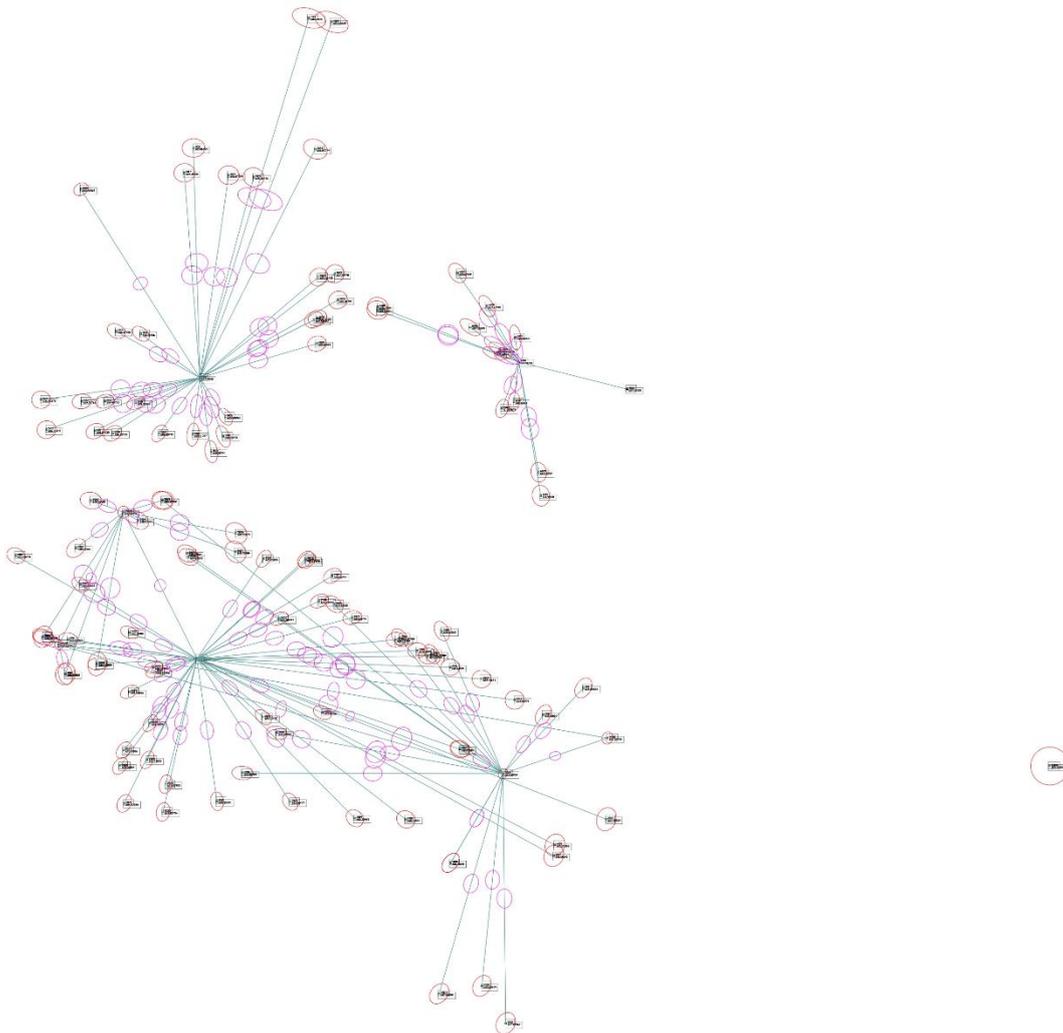


Figura 64 – Rete compensata relativa alla campagna di rilevamento del 2016 ed ottenuta dal *software* *StarNet*.

Si precisa che nella campagna di rilievo del 2016, così come in quelle del 2015 e 2017, la compensazione delle coordinate dei vertici (E, N, Elevazione) è stata ottenuta considerando scarti quadratici medi compresi entro i valori di massimo e minimo riportati in [Tabella 7].

Punti di stazione	Coordinate compensate [m]		sqm [m]
1000	E	442146,3416	0,0000
	N	5074198,0590	0,0000
	Elev	604,0900	0,0000
4000	E	442200,1810	0,0000
	N	5074196,6200	0,0000
	Elev	607,2650	0,0000
6000	E	442186,5172	0,0000
	N	5074200,0910	0,0000
	Elev	609,1070	0,0000
10000	E	442145,9647	0,0000
	N	5074162,3690	0,0000
	Elev	602,6830	0,0000
13000	E	442253,4145	0,0196
	N	5074148,7390	0,0196
	Elev	599,9200	0,0785
1010	E	442134,3577	0,0096
	N	5074195,0694	0,0072
	Elev	604,9973	0,0168
1020	E	442153,1100	0,0107
	N	5074223,5526	0,0098
	Elev	605,3644	0,0174
6001	E	442168,7663	0,0105
	N	5074207,0946	0,0097
	Elev	615,1031	0,0164
m200	E	442182,4822	0,0082
	N	5074207,1873	0,0110
	Elev	607,4298	0,0151
m201	E	442178,7734	0,0090
	N	5074211,3719	0,0101
	Elev	605,6714	0,0160
6010	E	442189,2941	0,0089
	N	5074183,0823	0,0107
	Elev	614,9054	0,0163

Punti di stazione	Coordinate compensate [m]		sqm [m]
2010	E	442175,0810	0,0098
	N	5074162,7164	0,0081
	Elev	605,4392	0,0175
2020	E	442157,7023	0,0079
	N	5074144,2081	0,0090
	Elev	603,6048	0,0171
20100	E	442128,5886	0,0045
	N	5074164,1625	0,0051
	Elev	607,2150	0,0086
m100	E	442137,4623	0,0092
	N	5074165,7055	0,0065
	Elev	602,7008	0,0167
3010	E	442177,9240	0,0089
	N	5074136,4436	0,0100
	Elev	606,1504	0,0191
m105	E	442191,0637	0,0103
	N	5074138,7113	0,0113
	Elev	605,2533	0,0191
400	E	442129,4016	0,0073
	N	5074160,4276	0,0107
	Elev	608,8585	0,0188
4001	E	442126,5966	0,0110
	N	5074165,1172	0,0087
	Elev	609,3877	0,0181
5000	E	442129,3871	0,0101
	N	5074160,4574	0,0114
	Elev	608,8480	0,0205
5008	E	442133,3906	0,0096
	N	5074161,7120	0,0121
	Elev	604,7395	0,0200
m108	E	442181,8671	0,0096
	N	5074120,8043	0,0109
	Elev	605,2561	0,0197

Tabella 6 - Estratto del file delle coordinate compensate dei vertici e degli scarti quadratici medi relativi alla campagna di rilevamento del 2016 ed ottenute dal software StarNet.

	Sqm [m]	
	Max [m]	Min [m]
E	0,0196	0,0045
N	0,0196	0,0051
Elev	0,0785	0,0086

Tabella 7 – Valori massimi e minimi degli scarti quadratici medi.

4.2 Elaborazione dei dati acquisiti con *laser scanner*

Allo scopo di generare una nuvola di punti *laser scanner* complessiva del sito, sono stati elaborati i dati acquisiti per mezzo del *software Faro Scene*, programma in dotazione ai *laser scanner* utilizzati. In tale circostanza si è potuto constatare come i tempi della fase di elaborazione, designata anche come *Data Processing*, cambiano in funzione della mole di dati da elaborare e del tipo di risultato a cui si vuole giungere.

Sono state elaborate solo le scansioni ancora non processate in precedenti lavori di tesi e dalle quali non erano state estratte nuvole di punti.

Nel dettaglio, per la generazione di una nuvola di punti relativa a Piazza dei Tribunali e alla Cappella 17 sono state restituite le scansioni: Smv007 - Smv025 - Smv026 - Smv027 - Smv028 - Smv029 - Tribu00 - Tribu01 - Tribu02 - Tribu03 - Tribu04; In aggiunta, si è fatto uso di scansioni in parte già elaborate quali: SCAN60 - SCAN61 - SCAN62 - SCAN63 - SCAN64 - SCAN65 - SCAN66 - SCAN69 - SCAN70 - SCAN72 - SCAN74 - SCAN76 - SCAN78 - SCAN80.

Per la realizzazione di una nuvola di punti attinente a Piazza del Tempio, invece, le scansioni elaborate sono: Tribu09 – Tribu10 – Tribu11 – Tribu12 – Tribu13 – Tribu14 – Tribu15 – Tribu16 – Tribu17 – Tribu18 – Tribu19 – Tribu20 – Tribu21 – Tribu22 – Tribu27 – Tribu28 – Tribu29 – Tribu30 – Tribu31 – Tribu32 – Tribu33;

4.2.1 Il *software Faro Scene*

Il *software Faro Scene* mette a disposizione un'ampia gamma di funzionalità. Nel caso studio è stato utilizzato per il posizionamento e la registrazione delle scansioni, la creazione di scansioni a colori e l'esportazione delle nuvole di punti in diversi formati in modo tale da permettere ulteriori elaborazioni con *software* differenti.

Inoltre, tale programma ha permesso di verificare il corretto e preciso posizionamento delle scansioni, individuando eventuali disallineamenti o errori in fase di registrazione delle stesse.

4.2.2 Importazione delle scansioni in *Faro Scene*

Con l'avvio del programma *Faro Scene* viene generato in automatico un file di lavoro, detto *Workspace*, all'interno del quale è possibile importare le scansioni acquisite.

L'inserimento delle stesse, in formato .fls, nel suddetto progetto, è stato effettuato con il semplice *drag and drop* dalla cartella di salvataggio. A importazione avvenuta,

nell'area di lavoro *Struttura* si genera la cartella *Scan* contenente le scansioni contrassegnate da una nuvola.

Si procede all'effettivo *upload* [Figura 66] dei dati, cliccando con il tasto destro su *Scan* e selezionando il comando “*Carica tutte le scansioni*” o, in maniera automatica, visualizzando le singole scansioni in *Vista piana* e quindi cliccando sempre con il tasto destro su ciascuna scansione e scegliendo i comandi *Visualizza* → *Vista piana*.

L'avvenuto caricamento delle scansioni è segnalato per mezzo di un quadrato verde adiacente alla nuvola [Figura 65].

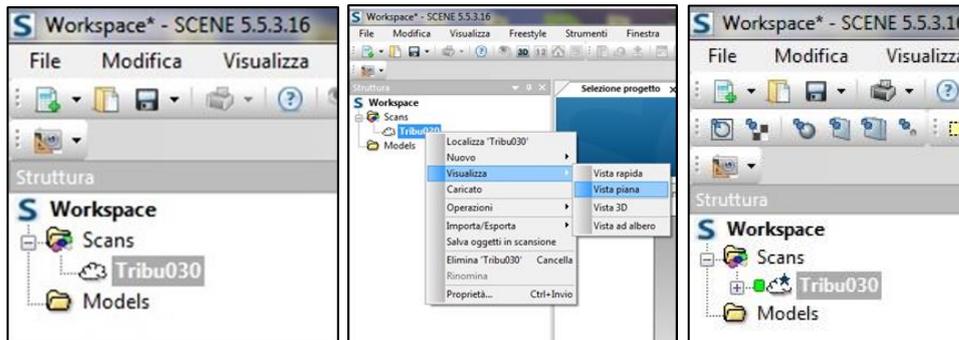


Figura 65 - Procedura di caricamento delle scansioni nel workspace.



Figura 66 - Scansione caricata.

4.2.3 Divisione ed estrazione delle scansioni “*Tribu*”

Dalla consultazione di precedenti lavori di tesi relativi al presente argomento, si è evinto che durante l'elaborazione delle scansioni *Tribu*, acquisite nella campagna di rilevamento del 2016, il *software* segnalava errori circa la corretta collocazione. Tali errori, erano di gran lunga superiori alla tolleranza stabilita per ottenere l'elevata precisione imposta dalla scala rappresentativa scelta.

L'anomalia fu attribuita a un'errata rettifica del *laser scanner* utilizzato in fase di acquisizione dati, il quale generava uno scostamento delle coordinate tra la porzione iniziale e finale di ogni singola scansione [Figura 67].

Per ovviare alla precedente complicazione, le scansioni *Tribu* sono state divise in due porzioni lungo la linea di scostamento.

Di seguito, si riporta la procedura seguita a tale scopo:

1. Visualizzazione in *Vista piana* delle singole scansioni *Tribu*;
2. Selezione della sezione destra/sinistra della scansione lungo la linea di scostamento attraverso lo strumento *Selettore rettangolare* [Figura 68];
3. Eliminazione di una delle due sezioni per mezzo del comando *Punti di Scansione* → *Elimina*;
4. Salvataggio, esportazione in formato .fls, e rinominazione della rimanente sezione con il medesimo nome e l'aggiunta del suffisso "dx" o "sx" a seconda della parte mantenuta [Figura 69].



Figura 67 - Scansione con visibile linea di scostamento.

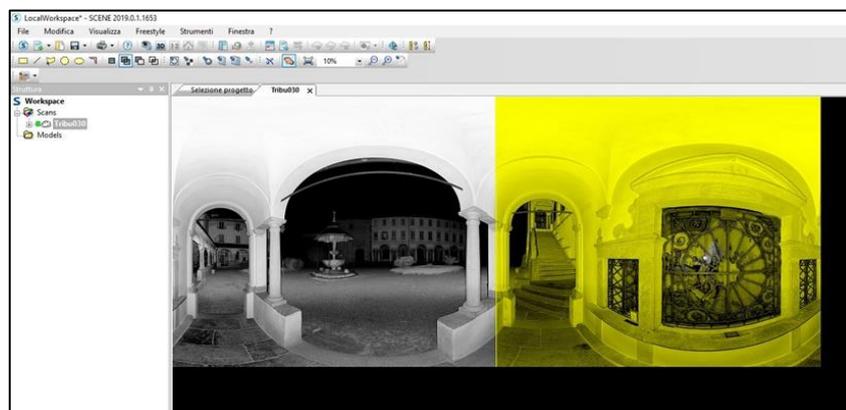


Figura 68 - Selezione di una sezione della scansione.

Ciascuna opzione è illustrata nei paragrafi successivi.

Collocazione delle scansioni per forma

Per i progetti di Piazza del Tempio e Piazza dei Tribunali si è proceduto a una prima disposizione manuale delle scansioni nell'area di lavoro secondo la "forma" degli edifici architettonici avvalendosi della visualizzazione *Vista corrispondenza* [Figura 70].

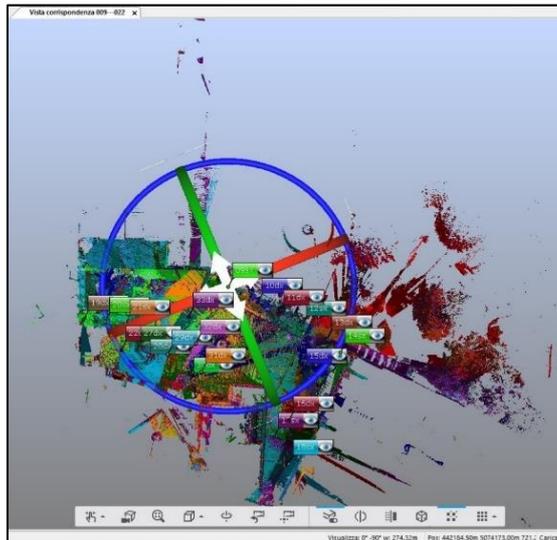


Figura 70 - Prima disposizione manuale delle scansioni in Vista corrispondenza.

La registrazione delle scansioni si è effettuata cliccando con il tasto destro sul gruppo delle stesse e selezionando i comandi *Operazioni* → *Registrazione* → *Colloca scansioni* [Figura 71], impostando come *Modalità di collocazione*: “da nuvola a nuvola” e gli aggiuntivi parametri come da immagine [Figura 72].

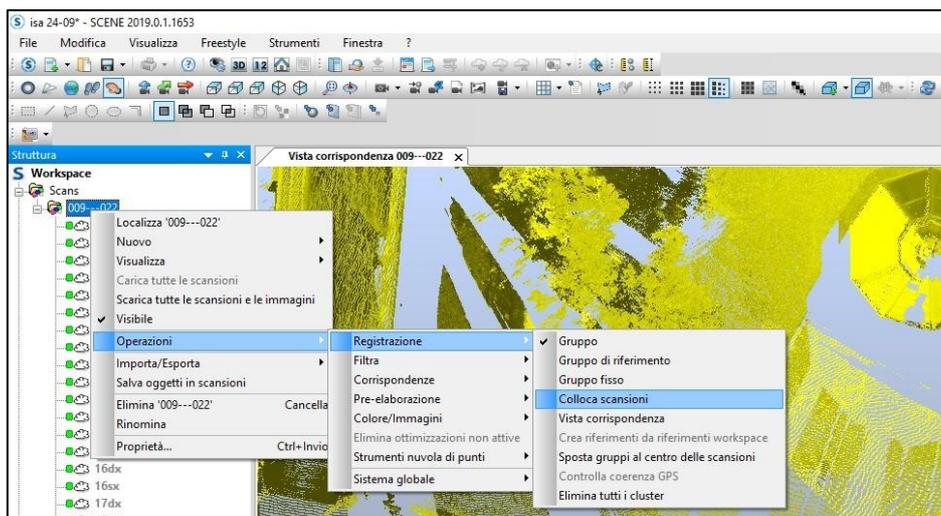


Figura 71 - Procedura di collocazione delle scansioni per forma.

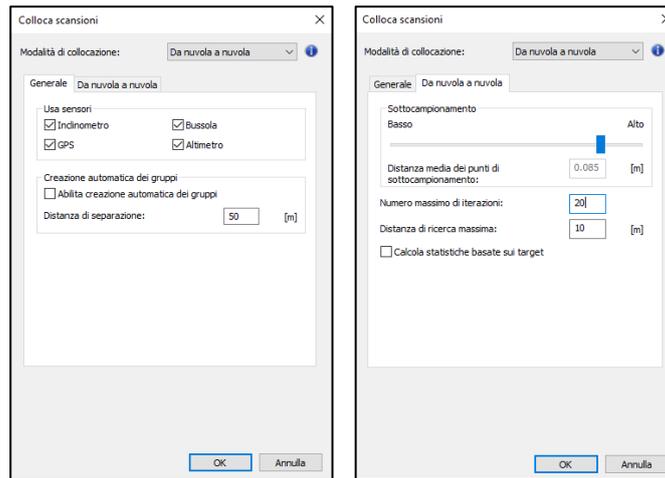


Figura 72 - Settaggio dei parametri.

Registrazione dei marker

Per la seconda metodologia di collocazione delle scansioni risulta essere propedeutica l'operazione di registrazione dei marker.

La stessa è stata effettuata, attraverso un *approccio manuale* o un *approccio semi-automatico*, con l'ausilio del *file Reference* e degli *eidotipi* realizzati in fase di acquisizione, entrambi contenenti il codice identificativo e univoco di ciascun marker e informazioni relative alla loro posizione. In altri termini, si è proceduto all'identificazione di almeno tre *Marker* nella visualizzazione *Vista piana* di ciascuna scansione.

Nel primo caso, si è selezionato il contorno di ogni scacchiera attraverso il comando *Selettore rettangolare* e si è registrato il baricentro della stessa tramite tasto destro sull'area selezionata *Crea Oggetti* → *Punto Medio* o *Punto Medio di contrasto* [Figura 73].

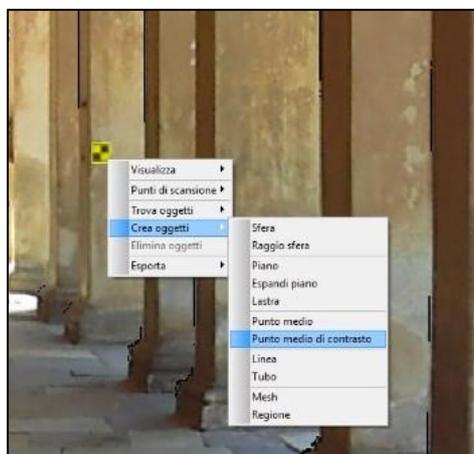


Figura 73 - Procedura di registrazione dei Marker tramite approccio manuale.

Nel secondo caso, semplicemente, si è individuato il baricentro della scacchiera tramite il comando *Checkerboards* posizionato sulla barra degli strumenti.

Il nuovo oggetto creato è stato rinominato con il codice identificativo del *Marker* in modo tale che il *software* associasse, automaticamente, a ciascun punto le coordinate riportate nel *file References* [Figura 74]. In seguito, è stato verificato che accanto a “Numero di punti di” (nel primo caso) e accanto a “*Checkerboards*” (nel secondo caso) comparisse il semaforo verde, indicatore di un punto ben posizionato e di un numero di punti, contenuti nella selezione, maggiore di 80.

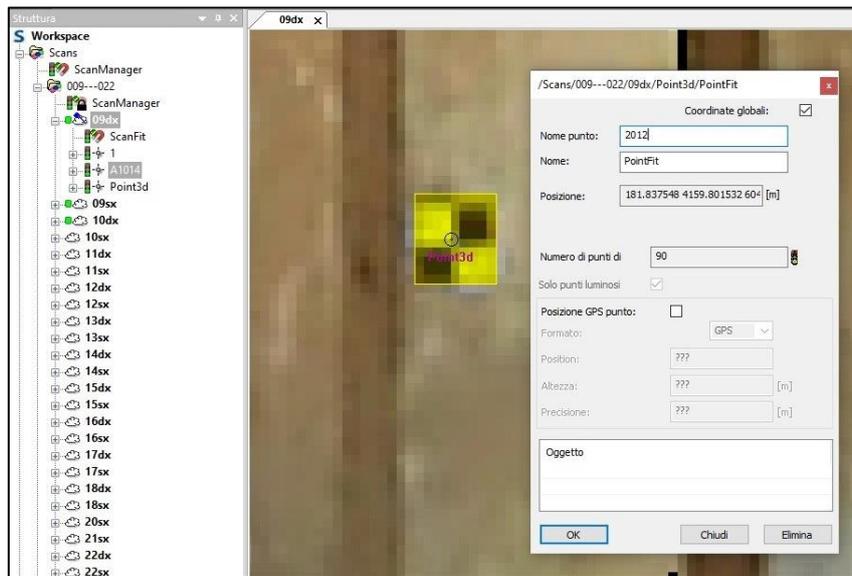


Figura 74 - Rinominazione Marker con relativo codice identificativo.

In assenza di almeno tre marker per ciascuna scansione si è proceduto, invece, alla registrazione di punti naturali (spigoli di porte o pavimentazioni etc.), scelti valutando la loro chiara identificazione in più scansioni, operazione indispensabile per una corretta associazione delle stesse. Questo metodo è stato inevitabile nel caso delle scansioni *Tribu* divise, in quanto nelle singole sezioni spesso non erano visibili tre *Marker* da registrare.

Collocazione delle scansioni basata sui target

Successivamente alla collocazione per forma e alla registrazione dei *Marker*, sui due progetti elaborati, per ragioni di precisione, è stata eseguita anche una collocazione delle scansioni con *Modalità di collocazione: “Basato sui target”* e le impostazioni riportate in figura [Figura 75].

Analogamente, attraverso tale opzione il *software* associa a tutti i *Marker* le giuste coordinate e unisce le scansioni elaborate ma, di fatto, l'operazione è effettuata in maniera più accurata rispetto alla precedente collocazione per forma.

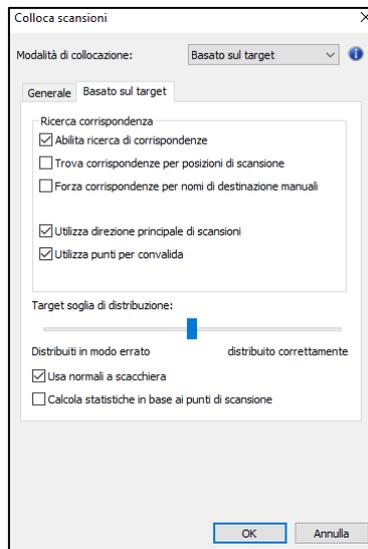


Figura 75 - Impostazioni per la collocazione delle scansioni basata sui *Target*.

4.2.5 Risultati scansione e Tensione dei *Target*

Una verifica della corretta collocazione delle scansioni può essere effettuata tramite il semaforo verde posto accanto a ciascuna cartella *Scanfit* ed in particolare, cliccando con il tasto destro su *ScanManager* e selezionando *Proprietà* → *Risultati scansione*, il *software* mostra i semafori degli *Scanfit* di tutte le scansioni e i corrispondenti errori medi di ogni registrazione.

Nelle figure seguenti sono riportati i *Risultati scansione* ottenuti, relativi alla prima [Figura 76 – 78] e ultima elaborazione [Figura 77 – 79] dei due progetti, in quanto la corretta collocazione delle scansioni non è un'operazione immediata, ma frutto di numerose iterazioni necessarie al raggiungimento del risultato ottimale. Nel dettaglio questo processo iterativo consiste nel verificare le tensioni dei *Target* ed eliminare e riposizionare quelli con distanze superiori alla tolleranza prefissata.

Considerato che l'intento è quello di utilizzare una scala di rappresentazione 1:50, ci si è accertati che l'errore dei *Target* fosse al di sotto della precisione della scala, ovvero, 1cm.

Infatti, per una scala 1:50, la precisione può essere calcolata come l'errore medio di graficismo, 2%, moltiplicato per il denominatore della scala stessa:

$$50 * 0,02 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

pari, quindi, alla metà della tolleranza (2 cm).

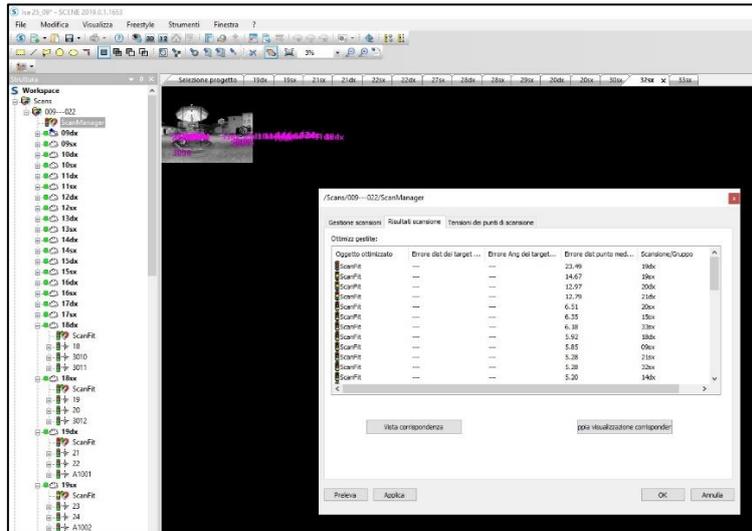


Figura 76 - Risultati scansione relativi alla prima elaborazione di Piazza del Tempio.

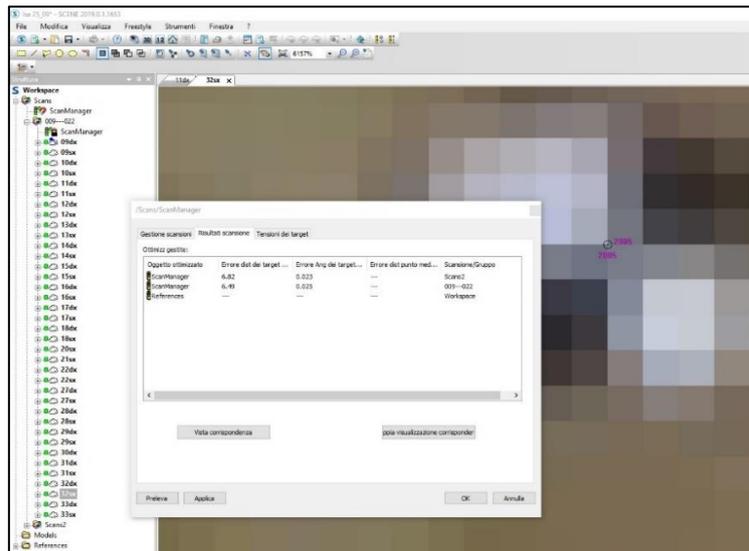


Figura 77 - Risultati scansione relativi all'ultima elaborazione di Piazza del Tempio.

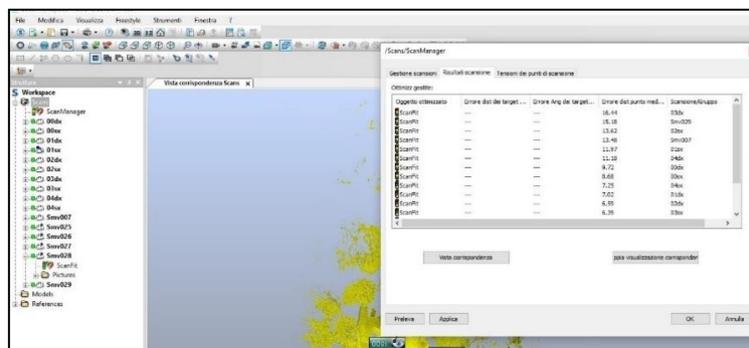


Figura 78 - Risultati scansione relativi alla prima elaborazione di Piazza del Tribunali.

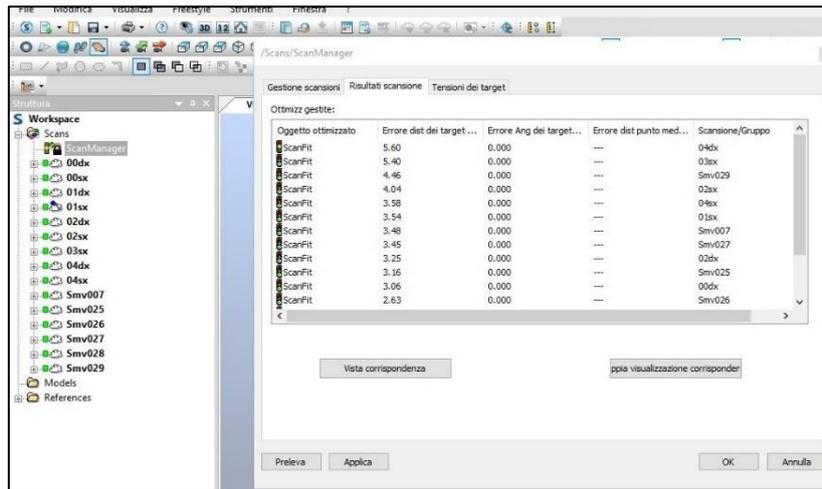


Figura 79 - Risultati scansione relativi all'ultima elaborazione di Piazza del Tribunali.

Si precisa, che per il progetto di *Piazza del tempio* la procedura di collocazione delle scansioni per *Target* è stata ripetuta più volte. Infatti, nella fase conclusiva della pulizia della nuvola da laser scanner, esposta nei paragrafi successivi, ci si è resi conto della non avvenuta colorazione di una scansione per cui si è proceduto all'eliminazione della suddetta scansione (Tribu 30sx) dal *workspace*, alla creazione di un ulteriore gruppo, *Scans2*, contenete la sola scansione in questione e alla replica per entrambi i gruppi della collocazione delle scansioni per *Target*.

Nel caso del progetto relativo a Piazza dei tribunali è stata, invece, riscontrata un'anomalia relativamente al risultato dello *ScanFit* della Tribu 04dx. È possibile notare dalla figura precedente come per tale scansione, nonostante l'errore sia inferiore della precisione, accanto allo *Scanfit* corrispondente sia presente un semaforo giallo.

4.2.6 Colorazione delle scansioni ed esportazione delle nuvole di punti

Dopo la collocazione delle scansioni, all'interno della struttura di ciascuna è presente la cartella *Pictures* contenente le immagini scattate dallo strumento dotato dell'opzione *Colore*. Per mezzo di tali fotogrammi è possibile associare informazioni RGB a tutti i punti delle scansioni ed effettuare, dunque, la cosiddetta attività di *Colorazione delle scansioni* cliccando con il tasto destro su *Scans* e selezionando *Operazioni* → *Colore/Immagini* → *Applica immagini*.

La colorazione delle scansioni è stata effettuata a fine elaborazione in modo da non appesantire i file e non allungare i tempi di elaborazione.

A fine processamento, è stata effettuata un'ulteriore verifica della riuscita della georeferenziazione delle scansioni attraverso le visualizzazioni *Vista 3D* [Figura 80] e *Vista corrispondenza* [Figura 81].



Figura 80 - Vista 3D di Piazza dei Tribunali a fine processamento.

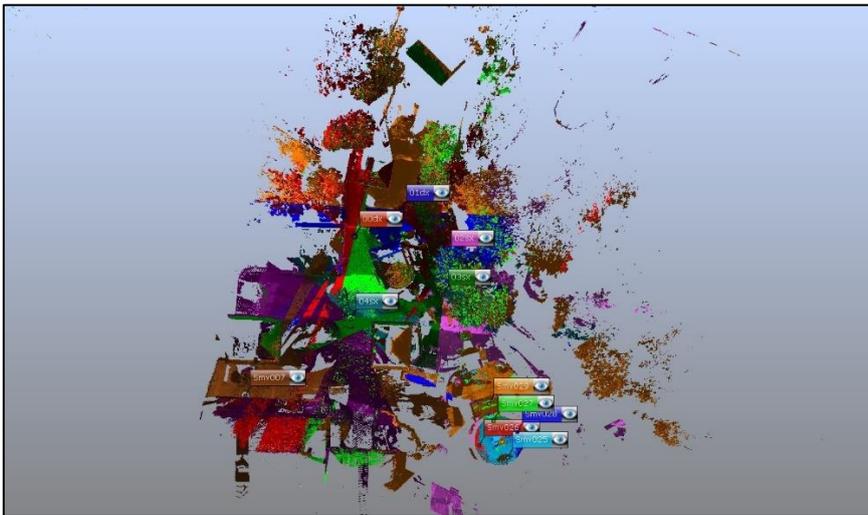


Figura 81 - Vista corrispondenza di Piazza dei Tribunali a fine processamento.

Si è infine proceduto all'esportazione dei due progetti di Piazza del Tempio e Piazza dei Tribunali, tramite tasto destro e scegliendo l'opzione *Importa/Esporta* → *Esporta nuvola di punti di scansione*. Il formato scelto è stato *.E57*, in quanto meno pesante e compatibile con i *software* utilizzati per il successivo processamento.

In egual modo anche le scansioni relative alla campagna di rilevamento del 2015, già georeferite in un precedente lavoro di tesi, sono state colorate ed esportate.

4.2.7 Il software *CloudCompare*

Il software *CloudCompare* è un programma *open source* utilizzato per l'elaborazione e la gestione di nuvole di punti.

Nato per confronti tra nuvole di punti, è dotato di molteplici algoritmi che permettono di estrarre informazioni sulla distanza tra nuvole dense, di valutarne la differenza di densità e di effettuare numerosi calcoli di tipo statistico, oltre a proiezioni, registrazioni, segmentazione o considerazioni di carattere geometrico.

In tale studio, *CloudCompare* è stato utilizzato per la pulizia, l'unione e il filtraggio delle nuvole da *laser scanner* ottenute da tutte le campagne di rilevamento precedentemente esposte, nonché per il successivo confronto e l'analisi metrica tra le stesse e una nuvola fotogrammetrica.

4.2.8 Pulizia e Unione delle nuvole di punti

Allo scopo di eliminare, all'interno delle nuvole, la vegetazione e tutti gli elementi di intralcio per una successiva modellazione degli edifici, sono stati caricati i file in *.E57* sul software *CloudCompare* [Figura 82] e si è effettuata una pulizia manuale delle nuvole.

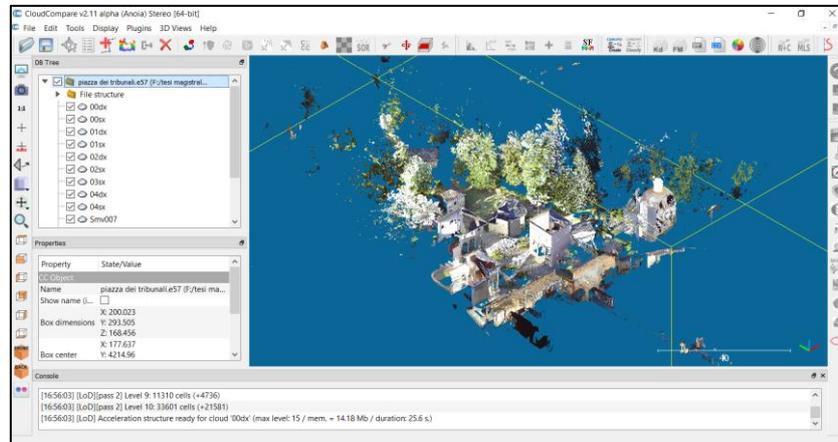


Figura 82 - Importazione della nuvola di punti relativa a Piazza dei Tribunali in *CloudCompare*.

Dopo diversi tentativi, si è potuto constatare che l'eccessivo peso delle nuvole non permetteva l'elaborazione e causava blocchi ripetuti del programma.

Per tale ragione e per velocizzare la pulizia delle nuvole si è scelto di unire, attraverso il comando *Edit* → *Merge*, poche scansioni per volta in gruppi e, successivamente, di lavorare sui ciascuno di essi. In particolare, le scansioni sono state raggruppate come riportato nella [Tabella 8].

Campagne di rilevamento	
2015	SCAN60 - SCAN61 - SCAN62 - SCAN63
	SCAN64 - SCAN65 - SCAN66 - SCAN69 – SCAN70
	SCAN72 – SCAN74 – SCAN76 – SCAN78 – SCAN80
2016	Tribu00dx - Tribu00sx - Tribu01dx - Tribu01sx - Tribu02dx -Tribu02sx -Tribu03sx -Tribu04dx - Tribu04sx
	Smv025 - Smv026 - Smv027 - Smv028
	Smv007
	Smv029
	Tribu09dx - Tribu09sx – Tribu10dx – Tribu10sx – Tribu11dx Tribu11sx – Tribu12dx – Tribu12sx
	Tribu13dx – Tribu13sx – Tribu14dx – Tribu14sx – Tribu15dx – Tribu15sx – Tribu16dx – Tribu16sx
	Tribu17dx – Tribu17sx – Tribu18dx – Tribu18sx – Tribu19dx – Tribu19sx – Tribu20sx – Tribu21sx – Tribu22dx –Tribu22sx
	Tribu27dx – Tribu27sx – Tribu28dx – Tribu28sx – Tribu29dx – Tribu29sx – Tribu30dx – Tribu30sx
	Tribu31dx – Tribu31sx – Tribu32dx – Tribu32sx – Tribu33dx – Tribu33sx
	Smv005 - Smv006 - Smv009 - Smv010
	Smv011 - Smv012 - Smv013 - Smv014
	Smv015 - Smv016 - Smv017 - Smv018
	Smv019 – Smv020 - Smv030 - Smv031
	Smv032 - Smv033 - Smv034 - Smv035 - Smv036
	Tribu005dx - Tribu005sx -Tribu006dx - Tribu006sx -Tribu007dx - Tribu008dx- Tribu008sx
	Tribu023sx - Tribu024sx - Tribu025dx - Tribu026dx -Tribu026sx
	Smv000- Smv001- Smv002- Smv003- Smv004- Smv021- Smv022- Smv023- Smv024
2017	Scan004 - Scan005 - Scan006 - Scan007 - Scan008 - Scan009 - Scan010 - Scan011 - Scan012 - Scan013 - Scan014
	Scan015 - Scan016 - Scan017 - Scan018
	Scan019- Scan020- Scan022- Scan023
	Scan024- Scan025

Tabella 8 - Gruppi di scansione utilizzati per la pulizia delle nuvole di punti.

Per i progetti elaborati fin dalle prime fasi è stata effettuata una pulizia molto accurata, mentre le altre scansioni, già in parte elaborate in lavori di tesi precedenti, sono state trattate in maniera più grossolana.

Nel dettaglio, per la pulizia manuale, sono state sfruttate le sezioni attraverso i comandi *Tools* → *Segmentation* → *Cross Section*. Gestendo il parallelepipedo dell’*Octree* con le relative frecce (verdi, blu e rosse) [Figura 83], i gruppi di scansione sono stati suddivisi

in tante sezioni adiacenti, successivamente trattate una per volta, posizionandosi su differenti viste [Figura 84].

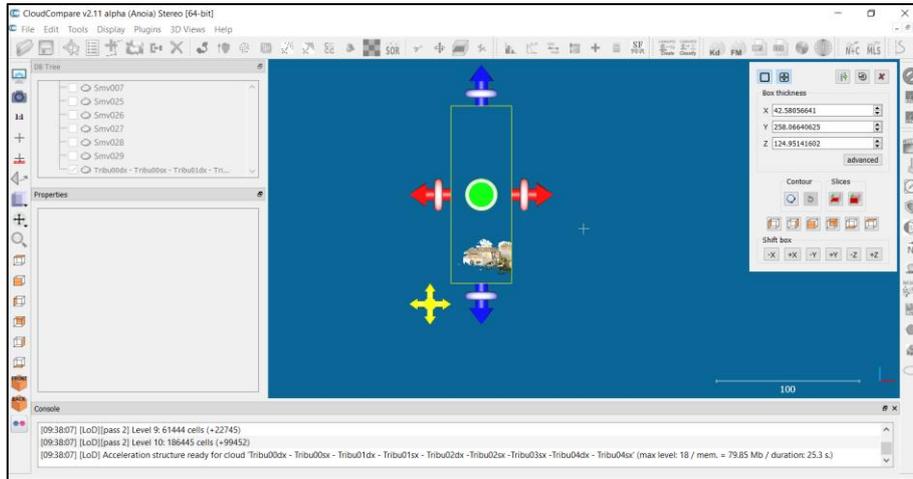


Figura 83 - Gestione del parallelepipedo dell'OcTree.

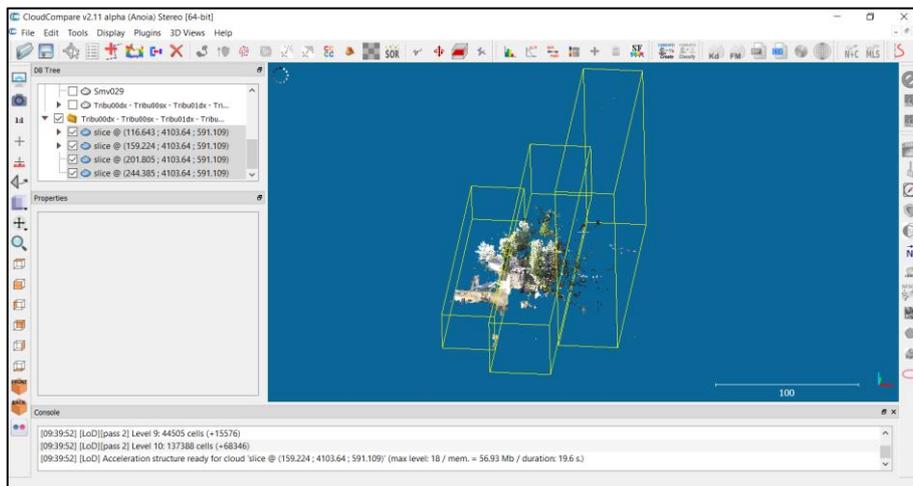


Figura 84 - Suddivisione in sezioni adiacenti del singolo gruppo di scansioni.

Gli elementi di disturbo presenti in ciascuna porzione di nuvola sono stati eliminati attraverso il comando *Segment* → *Segment Out* che permette di eseguire una selezione poligonale [Figura 85] e cancellare i punti all'interno della stessa eliminando la “sottonuvola” generata con il suffisso *.remaining*.

Infine, sono state unite tutte le restanti “sottonuvole” con suffisso *.segmented*, sempre attraverso il comando *Edit* → *Merge*, e salvate in formato *.txt* ottenendo gli stessi gruppi di scansioni, precedentemente esposti, ma puliti [Figura 86].

Questo *modus operandi* ha consentito di lavorare in maniera più efficace, permettendo di avere la certezza di eliminare solo le aree veramente superflue.

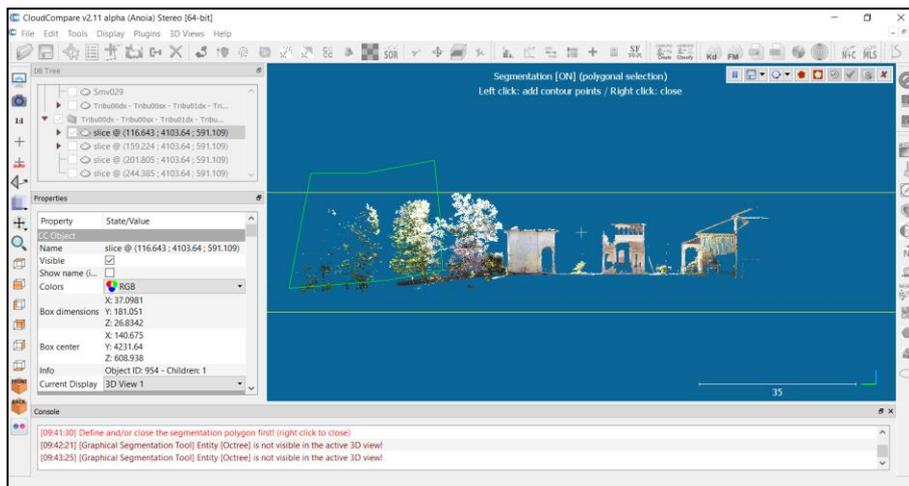


Figura 85 - Selezione poligonale degli elementi di disturbo in ogni sezione.

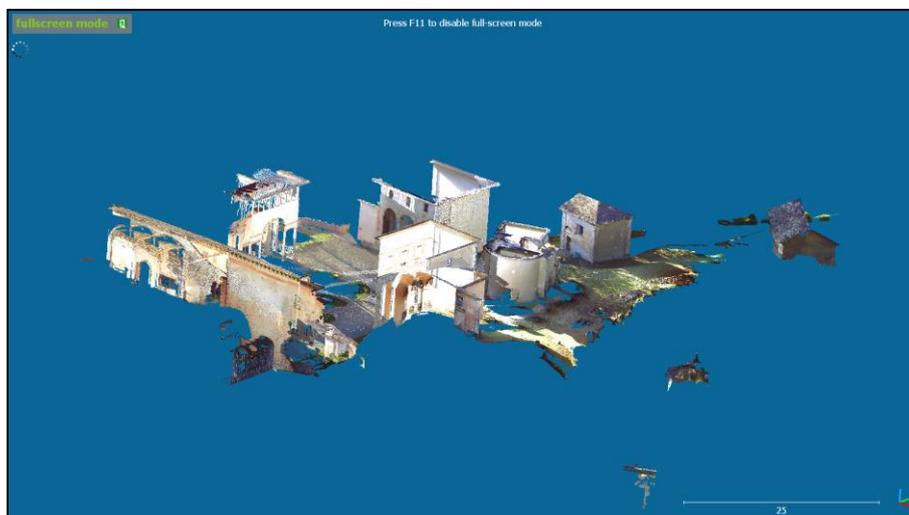


Figura 86 - Esempio di gruppo di scansione pulito.

In realtà, acquisendo dimestichezza con il *software*, la procedura, che ha richiesto una smisurata accortezza, è stata ritenuta eccessivamente contorta a fronte dell'importante entità di dati da gestire.

4.2.9 Filtraggio

Contrariamente a quanto atteso, la pulizia delle nuvole, non ha ridotto la dimensione dei *file* perciò, per consentire una migliore fruibilità degli stessi nella fase di modellazione e per poter generare un'unica nuvola che contenesse tutti i dati acquisiti nelle diverse campagne, si è dovuto optare a un filtraggio delle ventiquattro nuvole.

Questa operazione consente di ridurre il numero di punti di cui è costituita ciascuna nuvola, alleggerendo i relativi *file*. Si è scelta, quindi, la funzione *Subsample* e

l'algoritmo *Space* per eliminare punti dalla nuvola in modo da mantenere solo quelli a una distanza minima scelta.

Sono state effettuate diverse prove con vari valori di distanza, valutando quale fosse più adeguato per una gestione della nuvola totale, data dall'unione dei ventiquattro *file*, e contemporaneamente cercando di mantenere il più possibile la precisione richiesta dalla scala.

Nel dettaglio le distanze minime scelte sono state 4 cm, 2 cm, 1 cm e 0,5 cm generando, quindi, un totale di 96 *file*.

Quest'ultimi, uniti in base alle distanze scelte, hanno, infine, permesso di ottenere quattro progetti complessivi. Di seguito si riportano le dimensioni ultime per ciascun *file* [Tabella 9].

	Dimensione dei <i>file</i> [GB]
Intero progetto-subsampled 0,5 cm	35,3
Intero progetto-subsampled 1 cm	15,45
Intero progetto-subsampled 2 cm	5,78
Intero progetto-subsampled 4 cm	1,74

Tabella 9 - Dimensioni ultime di ciascun file.

Ovviamente, all'aumentare della distanza tra i punti le dimensioni dei *file* si riducono, compromettendo, tuttavia, la precisione della nuvola *laser*.

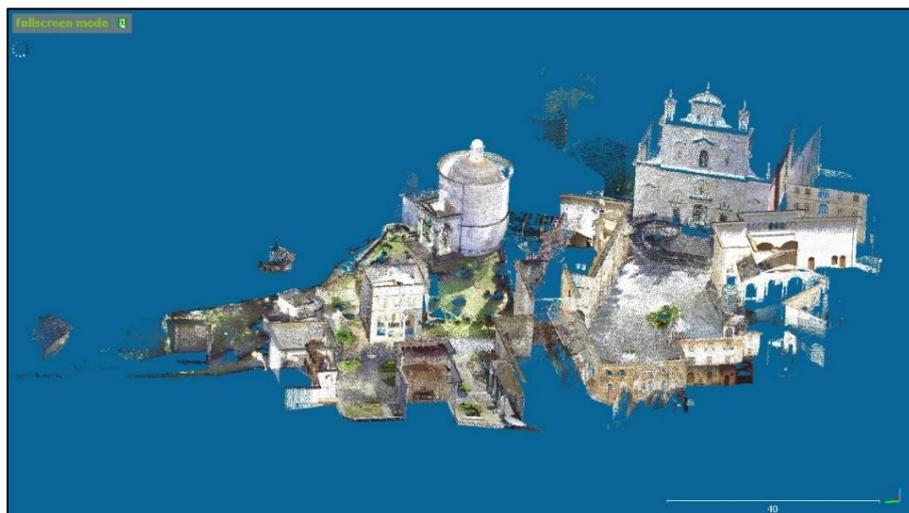


Figura 87 - Intero progetto *subsampled* a 0,5 cm.

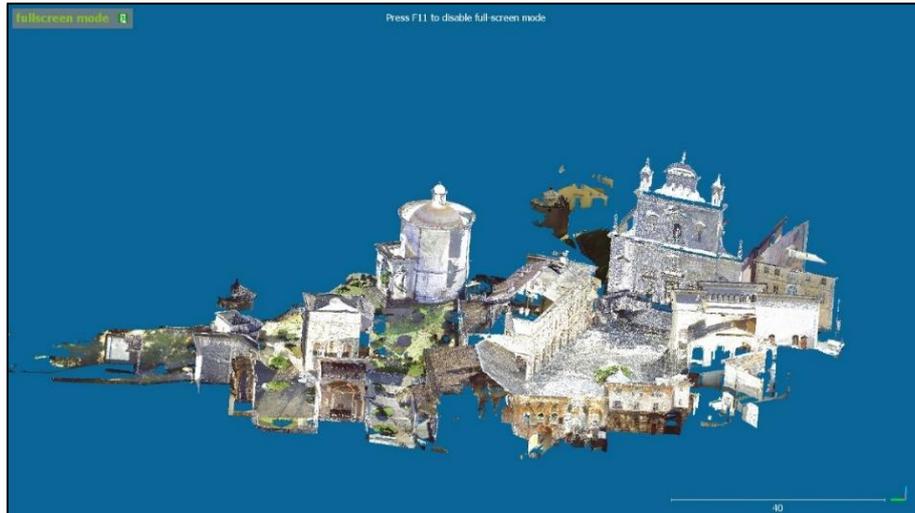


Figura 88 - Intero progetto *subsamped* a 4 cm.

4.3 Elaborazione dei dati acquisiti tramite tecnica fotogrammetrica

In questo elaborato, come anticipato, è stata utilizzata una nuvola fotogrammetrica, in formato .ply, già realizzata per condurre studi precedenti sui Sacri Monti di Varallo e ottenuta dall'elaborazione di dati acquisiti da un rilievo fotogrammetrico con UAV risalente al 2015.

L'integrazione della stessa, è stata necessaria al fine di sopperire le carenze derivanti dal rilievo con *laser scanner*, in quanto, tramite quest'ultimo, risulta difficile l'acquisizione di dati relativi a determinate aree, le cosiddette zone d'ombra, quali, per esempio, le coperture degli edifici.

La generazione della nuvola fotogrammetrica è avvenuta tramite il *software Agisoft PhotoScan*, il quale, si avvale della tecnica, già citata precedentemente, *Structure from Motion*, partendo da immagini bidimensionali.

Nel dettaglio, sono stati processati 296 fotogrammi nadirali.

Per allineare i fotogrammi, il *software* ricorre all'algoritmo SIFT, *Scale Invariant Feature Transform*, che permette l'individuazione dei punti in comune, i *keypoint*, presenti nelle zone di sovrapposizione, dei parametri di calibrazione della fotocamera e della posizione di presa di ciascun fotogramma. Conseguentemente, sono stati, quindi, orientati tutti i fotogrammi in un sistema di riferimento locale del *software* ed è stata generata una prima nuvola "sparsa" di punti.

La corretta georeferenziazione del prodotto è stata effettuata inserendo il *file* contenente le coordinate dei punti di dettaglio relativi alla rete topografica e collimando i *Marker* di un solo fotogramma in quanto gli altri automaticamente collimati dal *software*. Valutato il corretto posizionamento dei *Marker*, è stato, infine, possibile creare la nuvola “densa” di punti.

4.4 Nuvola *laser scanner* e nuvola fotogrammetrica a confronto

In questa fase dell’elaborato, la nuvola di punti *laser scanner*¹⁰ e la nuvola di punti fotogrammetrica, rispettivamente in formato .txt e .ply, sono state importate, tramite *drag and drop*, in *CloudCompare* al fine di analizzarne e confrontarne le caratteristiche intrinseche [Figura 91].

In particolare, è stato effettuato un confronto *Cloud to cloud* e un confronto della densità tra le due nuvole.

Il *software*, al momento dell’importazione, permette di scegliere le informazioni delle due nuvole da caricare [Figura 89 e Figura 90].



Figura 89 - Finestra relativa alle informazioni delle nuvole di punti.

¹⁰ Sottocampionata a 0,5 cm

Quest'ultima, infatti, nel presente lavoro di tesi, è stata successivamente modellata al fine di implementare parte del *database* descritto nei capitoli precedenti.

Una volta importate le nuvole, quindi, selezionandole entrambe, con il comando *Segment* si è mantenuta la stessa area [Figura 93 e Figura 94].

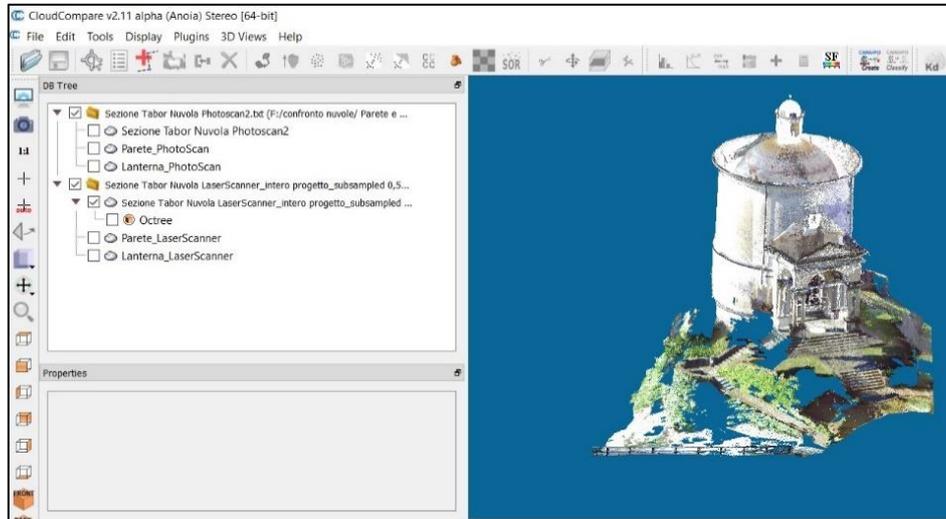


Figura 93 - Sezione della cappella 17 da nuvola *laser scanner*.

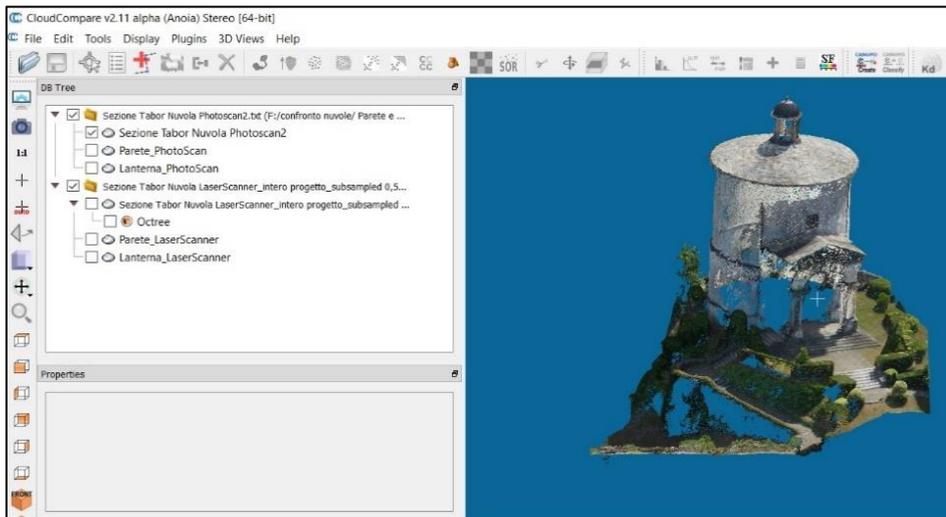


Figura 94 - Sezione della cappella 17 da nuvola fotogrammetrica.

In realtà, per ottenere risultati più attendibili, il confronto ha interessato solo il muro perimetrale e la lanterna della cappella, in quanto porzioni di edificio presenti in entrambe le nuvole; si è dunque proceduto a sezionarle come esposto precedentemente [Figura 95 e Figura 96].

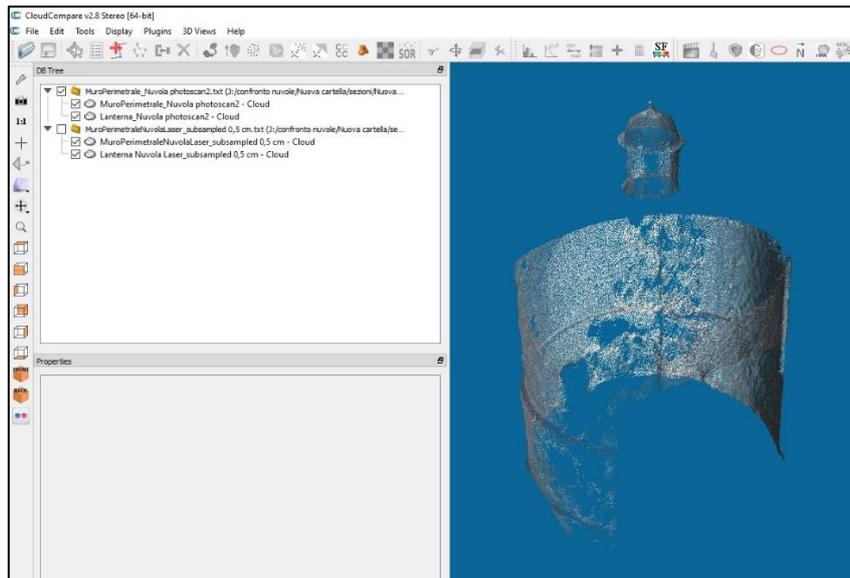


Figura 95 - Sezione di muro perimetrale e lanterna della cappella 17 da nuvola fotogrammetrica.

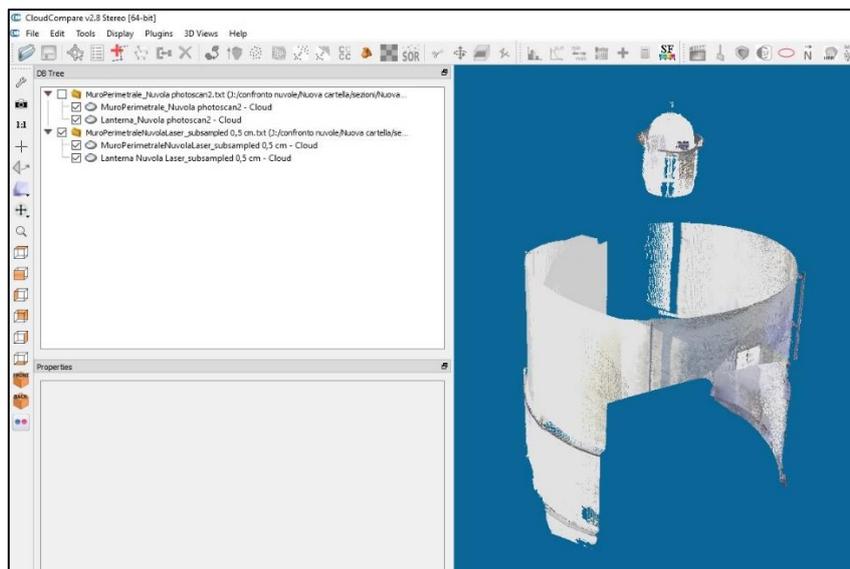


Figura 96 - Sezione di muro perimetrale e lanterna della cappella 17 da nuvola laser scanner.

Di seguito, si riportano le dimensioni e i numeri di punti delle suddette sezioni [Tabella 10].

	Numero punti	Dimensione file [MB]
Parete <i>LaserScanner</i>	4,011,896	459
Lanterna <i>LaserScanner</i>	209,239	24,1
Parete Fotogrammetrica	110,668	9,1
Lanterna Fotogrammetrica	8,673	0,715

Tabella 10 - Numero di punti relativo alle diverse sezioni.

4.4.1 Cloud to cloud Distance

Il primo confronto tra le sezioni di nuvole è stato effettuato al fine di avere una stima della qualità metrica delle stesse, in relazione all'effettiva distanza reciproca tra i punti che le costituiscono. A tal fine sono state selezionate le porzioni *Parete LaserScanner* - *Parete Fotogrammetrica* e utilizzato il comando “*Cloud/Cloud dist.*” posto nella scheda *Tools*→*Distances*. Stessa procedura si è ripetuta successivamente per le sezioni *Lanterna LaserScanner* - *Lanterna Fotogrammetrica* [Figura 97].

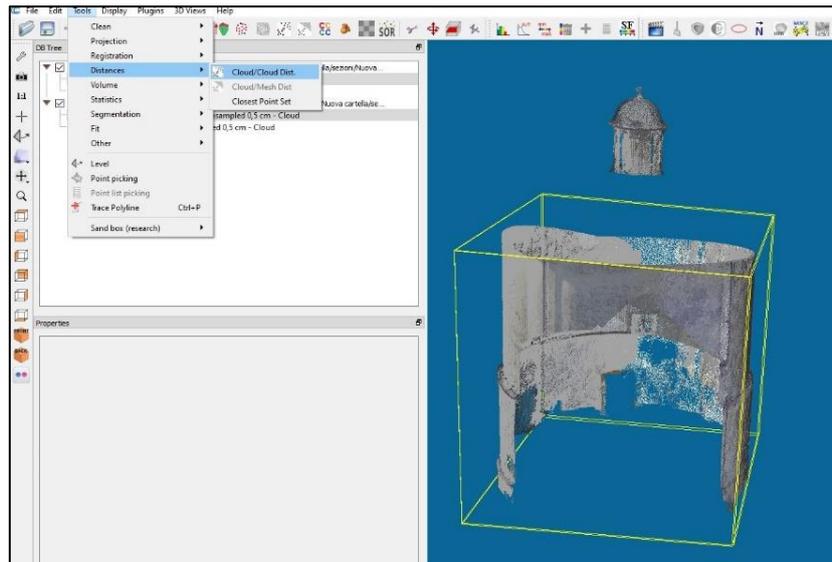


Figura 97 - Comando *Cloud/Cloud Distance*.

A questo punto, il *software* chiede di definire il ruolo di ogni nuvola e quindi di impostare la nuvola da prendere come riferimento da cui calcolare lo scostamento dell'altra. Si è scelto di impostare, in entrambi i casi, come *standard* di paragone le sezioni da *laser scanner* [Figura 98 e Figura 99].

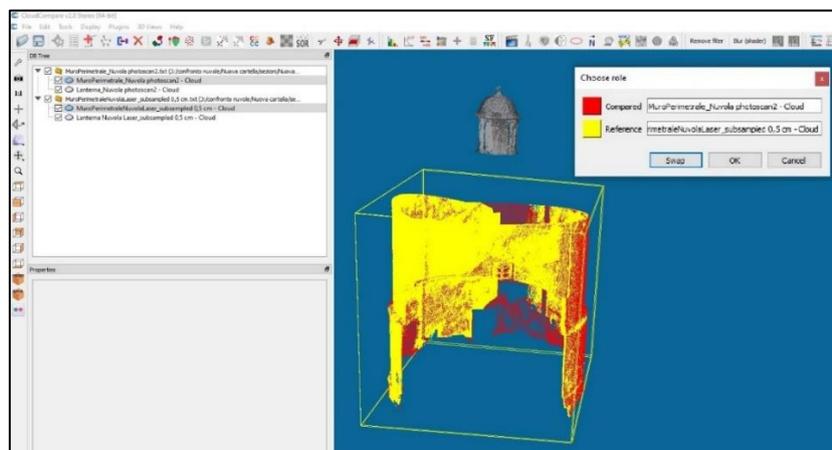


Figura 98 - Impostazioni della sezione “Muro Perimetrale da Laser Scanner” come riferimento del confronto.

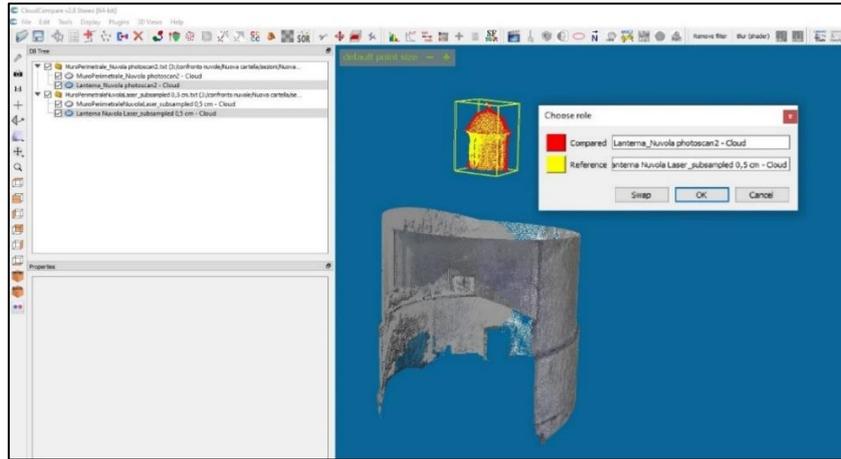


Figura 99 - Impostazioni della sezione "Lanterna da Laser Scanner" come riferimento del confronto.

Inizialmente il *software* esegue un primo calcolo per ricavare valori approssimati di distanza massima, media e deviazione *standard* tra le nuvole. Gli stessi sono, successivamente, utilizzati nel settaggio automatico dei parametri per il computo reale della distanza.

L'assenza di punti sul retro della sezione del muro perimetrale acquisita con *laser scanner*, dovuta alla presenza della vegetazione, comportava l'impostazione della distanza massima di *default* di circa 3m, allora, in entrambi i casi, si è scelto di impostare il valore 0,20 m nel campo *max. distance* in modo tale da limitare la ricerca dei *nearest neighbors* tra le due nuvole [Figura 100].

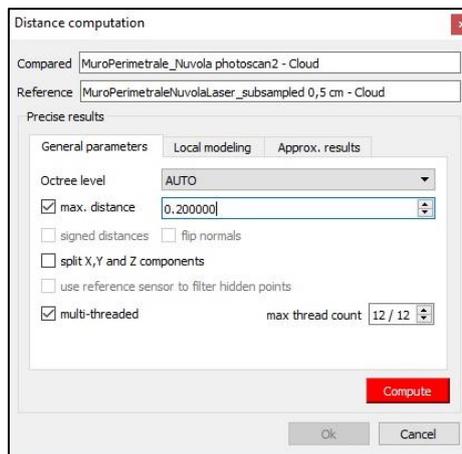


Figura 100 - Impostazione del campo max. distance.

Avviata la fase di computazione, si è ottenuto il risultato finale rappresentato in base a una scala di colori RGB che va dal blu al rosso, passando per il verde, in funzione della distanza tra i punti delle nuvole analizzate.

Sono riportati e commentati i risultati ottenuti:

Muro perimetrale cappella 17

Dall'immagine [Figura 101], è subito evidente una prevalenza di colorazione blu e verde che indica una ridotta distanza tra le due nuvole di punti. La presenza di colorazioni rappresentative di distanze superiori si evince, invece, solo nella porzione retrostante della parete, caratterizzata, come già accennato, dalla mancanza di punti *laser scanner*.

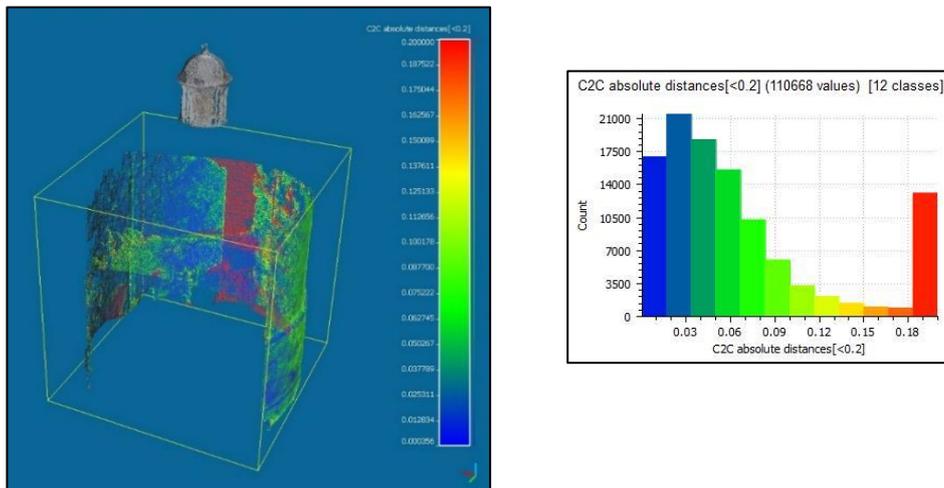


Figura 101 - Risultato analisi *cloud-to-cloud*: *Distance* per la sezione “Muro perimetrale”.

Dal grafico, che riporta sull'asse delle ordinate la frequenza con cui il dato si ripete e sull'asse delle ascisse la distanza che intercorre tra le due porzioni di nuvole di punti, si nota che la maggior parte del numero totale di punti analizzati ricade nell'intervallo tra 0 e all'incirca 4 cm. Nel dettaglio, i punti sono stati ripartiti dal *software* in 12 classi di scostamento, da una distanza minima di all'incirca 0 m a una massima di 0,20 m come impostato; di 110668 punti della porzione analizzata, circa il 75% ricade al di sotto degli 8 cm di distanza. Valore accettabile se si tiene in conto anche della mancata sovrapposizione delle due nuvole sul retro dell'edificio [Figura 102].

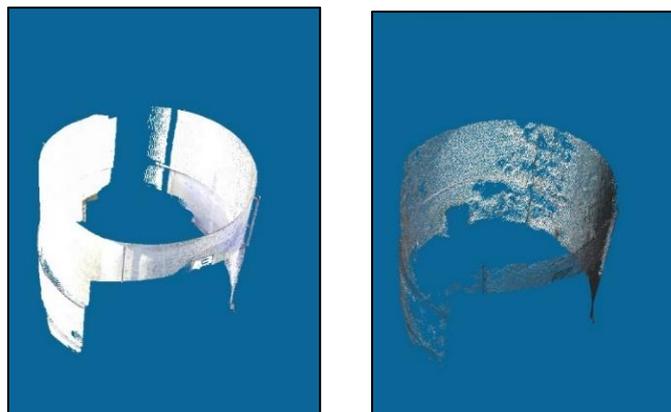


Figura 102 - Mancata sovrapposizione del retro delle due nuvole a causa di assenza di punti.

Lanterna cappella 17

Analogamente, la differenza metrica tra i punti della sezione *Lanterna* è caratterizzata per lo più da una colorazione blu e verde, ad eccezione della parte superiore in cui prevale una colorazione rossa [Figura 103].

Tuttavia, gli elevati valori di distanza tra le due nuvole in tale zona sono giustificati in quanto la maggior parte dei punti appartenenti alla nuvola *laser scanner* sono stati ottenuti da scansioni acquisite dall'interno della Cappella 17, mentre il rilievo fotogrammetrico è stato esclusivamente esterno.

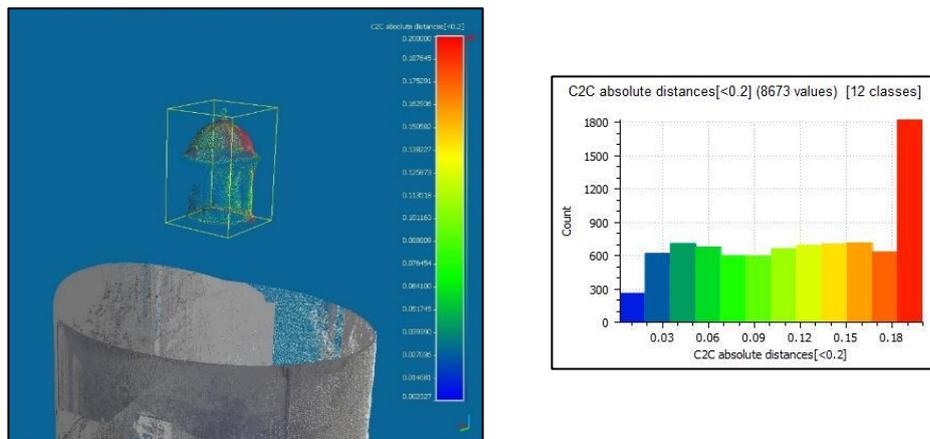


Figura 103 - Risultato analisi *cloud-to-cloud: Distance* per la sezione “Lanterna”.

4.4.2 Confronto della densità

È stata confrontata la densità dei punti delle due nuvole in questione sempre in relazione alle due porzioni, lanterna e muro perimetrale, analizzate precedentemente.

CloudCompare, attraverso il comando *Tools* → *Other* → *Density*, calcola automaticamente la densità, confrontando per ogni punto analizzato di una delle suddette porzioni, il numero di *neighbors* in una sfera di raggio R che nel caso in esame è stato impostato pari a 5 cm [Figura 104].

Come si può constatare dai grafici, in entrambi i casi studio, la densità della nuvola *laser scanner* [Figura 105 e Figura 107] risulta di gran lunga superiore rispetto a quella fotogrammetrica [Figura 106 e Figura 108]. Nel dettaglio, le porzioni *Lanterna* e *Muro perimetrale* acquisite con *laser scanner* risultano essere rispettivamente all'incirca 30 e 60 volte più dense di quelle acquisite con drone [Figura 109].

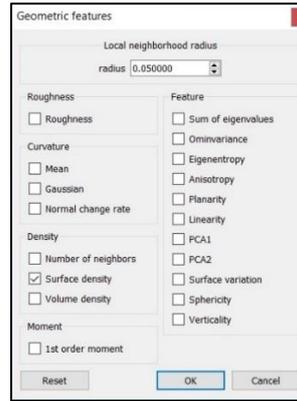


Figura 104 - Impostazione parametro raggio.

Inoltre, è evidente che i punti della nuvola fotogrammetrica sono distribuiti in maniera regolare contrariamente a quelli della nuvola *laser scanner*, il cui assetto dipende dalla distanza tra strumento di acquisizione e oggetto rilevato.

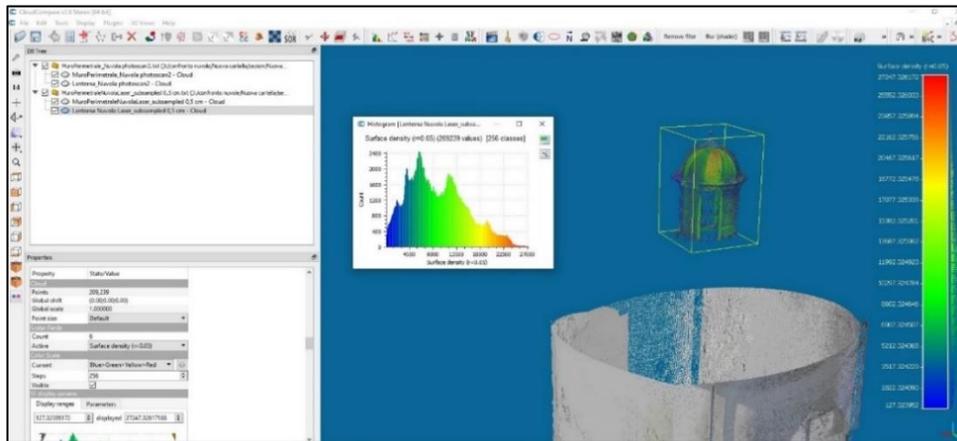


Figura 105 - Risultati confronto della Densità per la sezione "Lanterna" della nuvola *laser scanner*.

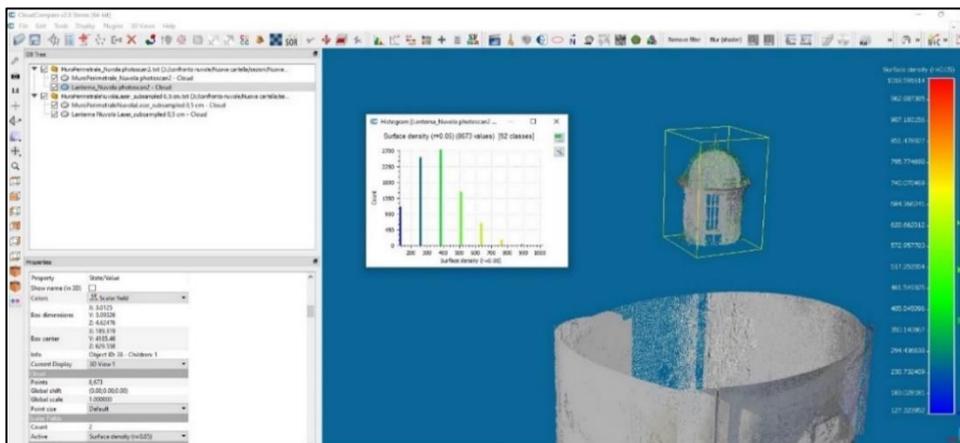


Figura 106 - Confronto della Densità per la sezione "Lanterna" della nuvola fotogrammetrica.

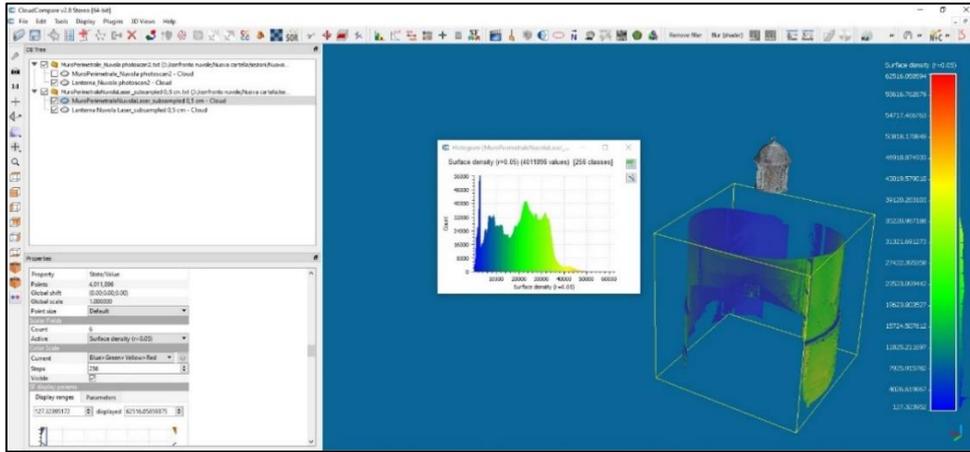


Figura 107 - Confronto della Densità per la sezione "Muro Perimetrale" della nuvola *laser scanner*.

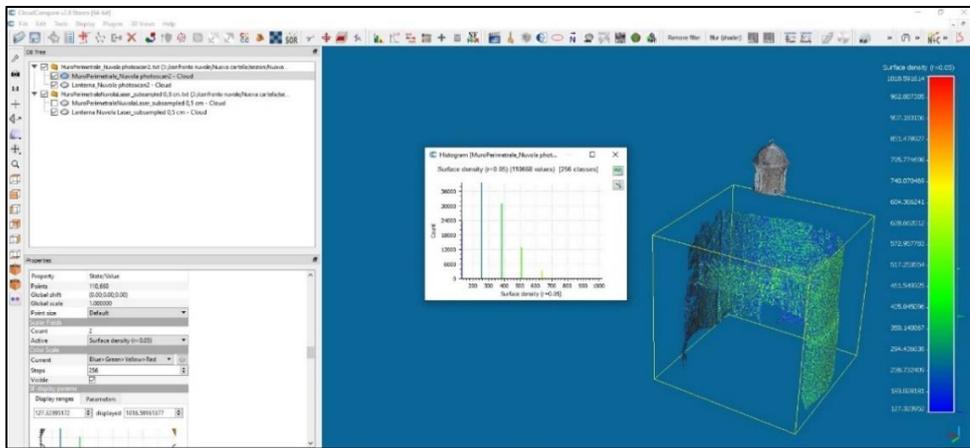


Figura 108 - Confronto della Densità per la sezione "Muro Perimetrale" della nuvola fotogrammetrica.

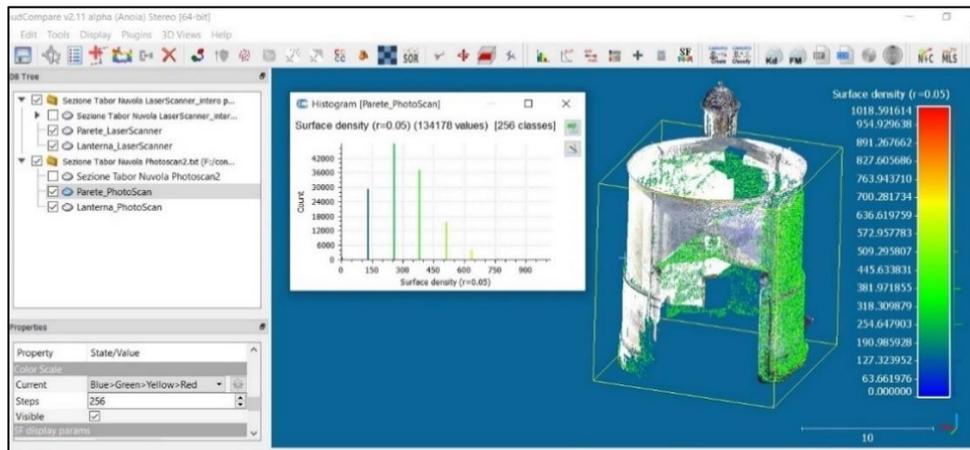


Figura 109 - Evidenziazione della minor densità della nuvola fotogrammetrica rispetto a quella *laser*.

In conclusione, dalle analisi effettuate si è potuto consolidare la tesi secondo cui indagini su gestione e manutenzione di beni architettonici non possono fare affidamento, per qualità del dato metrico e per densità, esclusivamente a un rilievo

fotogrammetrico. Si è scelto, dunque, di integrare lo stesso al rilievo *laser scanner* considerati, anche, i limiti visivi di quest'ultimo in particolare nell'acquisizione delle coperture.

4.5 Preparazione della nuvola di punti per la modellazione

La modellazione della Cappella 17, descritta nel capitolo successivo, necessita di operazioni preliminari di preparazione della nuvola di punti.

Occorre precisare che, al fine di evitare rallentamenti del *software* di modellazione, il *file* utilizzato in seguito è quello relativo alla sezione della Cappella 17 della nuvola *laser scanner* sottocampionata a 1 cm.

4.5.1 Taglio e unione delle nuvole da *laser scanner* e da fotogrammetria

Per i rilievi architettonici, in cui gli oggetti presentano specificità al quanto complesse e necessitano, quindi, di un livello di dettaglio elevato, nasce l'esigenza di integrare le diverse tecniche di acquisizione al fine di ottenere la restituzione desiderata in termini di completezza e affidabilità. Nel caso studio, come anticipato, si è deciso di seguire proprio tale strategia di lavoro. L'utilizzo complementare della nuvola da *laser scanner* e di quella fotogrammetrica ha permesso di ottenere il rilievo completo della Cappella 17, limitando le zone d'ombra in corrispondenza delle coperture.

Tramite il *software CloudCompare*, si è, dunque, optato per il taglio della nuvola fotogrammetrica mantenendo i soli punti relativi alle coperture [Figura 110]. Quest'ultimi sono stati, in seguito, sovrapposti a quelli della nuvola *laser scanner*.

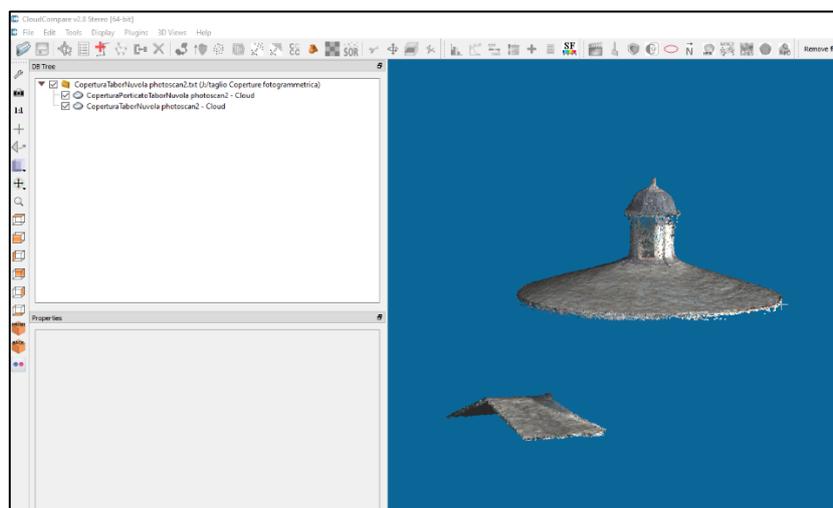


Figura 110 - Taglio coperture da nuvola fotogrammetrica.

La nuvola finale, ottenuta dall'unione della porzione di nuvola fotogrammetrica e da quella *laser scanner*, è stata esportata in formato .E57 e presenta una dimensione di circa 400 Mb [Figura 111].

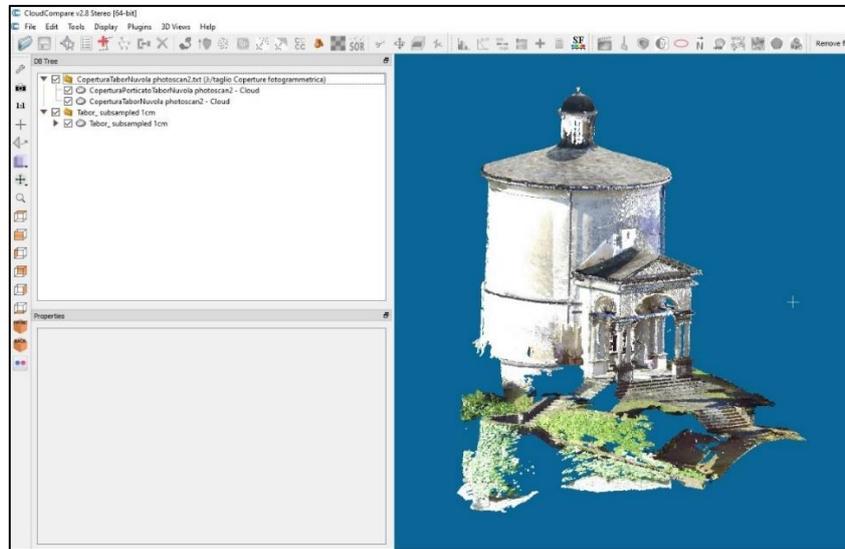


Figura 111 - Nuvola fotogrammetrica e *laser* unite.

4.5.2 Suddivisione della nuvola di punti in sottoregioni

Al fine di agevolare la fase di modellazione, si è scelto di suddividere la nuvola di punti finale in sottoregioni per mezzo del *software CloudCompare*. Il procedimento effettuato è stato totalmente analogo a quello già utilizzato per la pulizia delle nuvole. Nell'immagine seguente [Figura 112] sono riportate le sottoregioni create.



Figura 112 - Sottoregioni Cappella 17.

A posteriori, ci si è accorti di aver, probabilmente, effettuato una suddivisione eccessiva motivata da un'inesperienza nel campo della modellazione di edifici esistenti.

4.5.3 Esportazione delle sottoregioni della nuvola di punti

L'estensione delle sottoregioni della nuvola di punti deve essere compatibile con il *software* utilizzato successivamente per la modellazione della cappella. Nel caso studio, quindi, ci si è serviti del *software ReCap Pro* per la sola conversione dell'estensione dei file.

Il *software Autodesk ReCap Pro*

Autodesk ReCap è un programma 3D per progetti di scansione *laser* e fotogrammetria. *Recap* sta per “*Reality Capture*” ovvero “catturare la realtà”.

Il compito di questo *software* è quello di preparare le nuvole di punti dando la possibilità di esportarle in un formato proprietario, che può integrarsi perfettamente in altre applicazioni *software Autodesk*. *Recap Pro* è una versione aggiuntiva di *Recap*, è corredata di maggiori funzionalità, infatti, include manipolazione, gestione e registrazione della nuvola di punti¹¹.

Importazione ed esportazione tramite *ReCap Pro*

Nel *software Recap Pro* si è proceduto con la creazione di un nuovo progetto di scansione e il caricamento delle sottoregioni in formato .E57 tramite il semplice *drag and drop*. Successivamente al caricamento da parte del *software* delle diverse porzioni, è stata aperta la finestra di lavoro che permette la visualizzazione delle stesse [Figura 113].

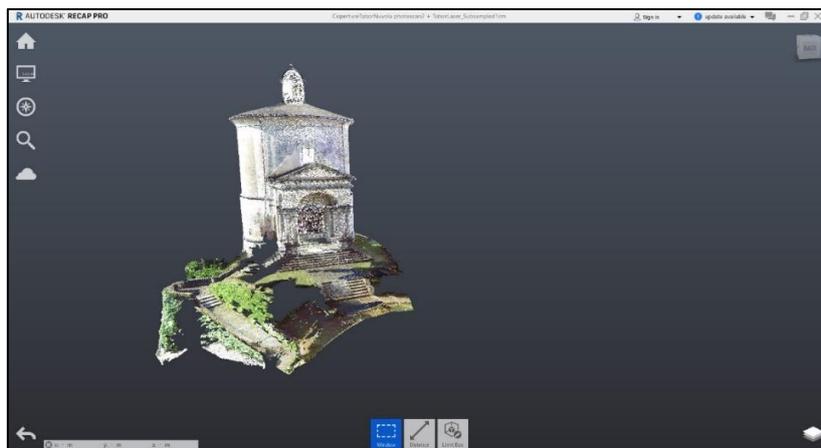


Figura 113 - Visualizzazione delle sottoregioni della nuvola in *ReCap Pro*.

¹¹ <https://help.autodesk.com/view/RECAP/2018/ENU/?guid=GUID-91810DA7-71F5-4C6C-989C-790455B7C847>

In seguito, le singole sottoregioni sono state esportate, con estensione `.rcp`, attraverso l'apposito comando presente nel menù *Home*.

5 La modellazione tridimensionale

Il *database* di Main10ance, come accennato, è costituito da informazioni a scala differente. Al fine di gestire dati relativi alla scala del costruito, ed in particolare inerenti alla Cappella 17, nella presente tesi, si è fatto ricorso all'HBIM. Prima di illustrare quest'ultimo e le procedure adottate, si ritiene fondamentale, tuttavia, fornire una definizione di BIM, in quanto “padre” dell'HBIM.

5.1 La metodologia BIM

L'acronimo BIM racchiude tre definizioni connesse e complementari, tutte incentrate sulle “Informazioni” riguardanti il “*Building*”, ovvero l'ambiente costruito [Figura 114]:

- *Building Information Model*: modello informativo contenente tutte le informazioni relative all'intero ciclo di vita dell'opera;
- *Building Information Modeling*: metodologia operativa, processo di programmazione, progettazione, realizzazione e manutenzione di una costruzione che utilizza il suddetto modello multi-dimensionale informativo¹²;
- *Building Information Manager*: organizzazione e controllo del processo¹³.

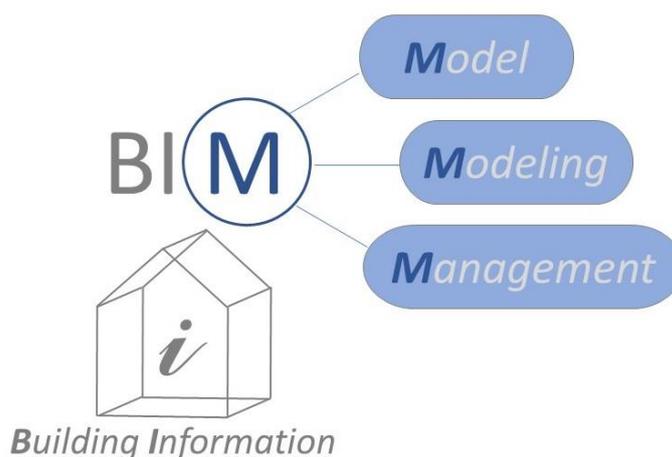


Figura 114 - I tre significati dell'acronimo BIM.

¹² <http://biblus.acca.it/focus/bim-building-information-modeling/>

¹³ G. M. DI GIUDA, Introduzione al BIM Protocolli di modellazione e gestione informativa, SOCIETÀ EDITRICE ESCULAPIO, Agosto 2019.

Nel contesto della presente tesi, si è ritenuto che la definizione più appropriata da adottare per il BIM fosse *Building Information Modeling*.

Grazie alla metodologia BIM, infatti, un'opera è realizzata mediante un modello virtuale che non è solo una semplice rappresentazione tridimensionale, ma funge da “contenitore” di molteplici informazioni [Figura 115].

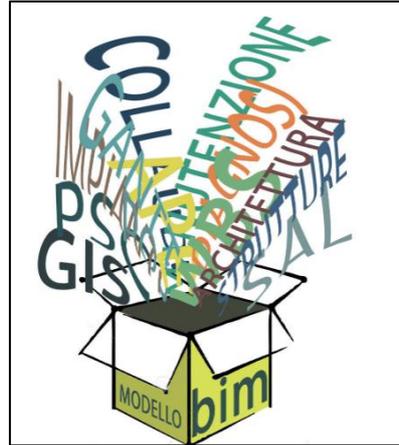


Figura 115 - Rappresentazione del modello BIM come contenitore di informazioni.
Fonte: FERRARA A.; FELIGIONI E., *BIM E PROJECT MANAGEMENT. Guida pratica alla progettazione integrata*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2019.

Tutti gli elementi di tale modello sono suddivisi in specifiche categorie univoche (oggetti), ciascuna con una precisa identità e corredata da definizioni geometriche oltre che da una serie di dati alfanumerici relativi ad esempio a localizzazione, materiali, caratteristiche tecniche, aspetto manutentivo, stima dei costi ecc.

Un modello BIM, quindi, assume il ruolo di un *database* costantemente implementabile ed interrogabile, mentre per processo BIM non si intende il semplice possesso di informazioni, ma l'attività di estrazione, combinazione e condivisione delle stesse.

Tale attività è possibile in quanto la metodologia BIM si propone come un approccio basato su collaborazione, coordinamento, condivisione e confronto, in altri termini, integrato. Il principio base di questo approccio diventa, dunque, l'interazione costante tra gli attori del processo, afferenti alle diverse discipline, e la condivisione istantanea delle informazioni e delle modifiche delle stesse [Figura 115].

La metodologia rende il processo progettuale fluido e continuo e le informazioni, aggiunte e aggiornate man mano che vengono acquisite, sempre congruenti e mai ridondanti.

Il risultato della sua applicazione è un aumento della qualità progettuale dovuto a un'importante riduzione di errori, costi e tempi connessi all'intero ciclo di vita dell'opera.

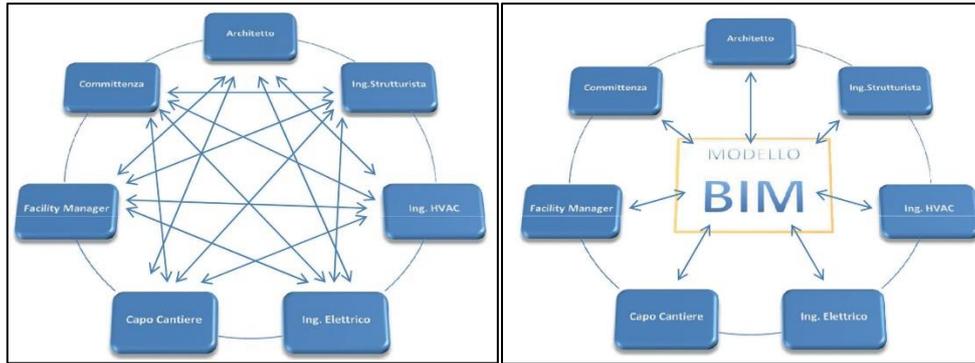


Figura 116 - Relazione tra gli attori nella progettazione tradizionale (sinistra) e integrata (destra).
 Fonte: FERRARA A.; FELIGIONI E., *BIM E PROJECT MANAGEMENT. Guida pratica alla progettazione integrata*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2019.

La cooperazione sinergica e coordinata delle molteplici parti coinvolte e il processo iterativo di scambio dati [Figura 117] subentra, quindi, al tipico processo tradizionale [Figura 118], caratterizzato da un flusso di lavoro lineare e sequenziale e dalla presenza di figure professionali dedite a svolgere individualmente le fasi a loro dedicate.

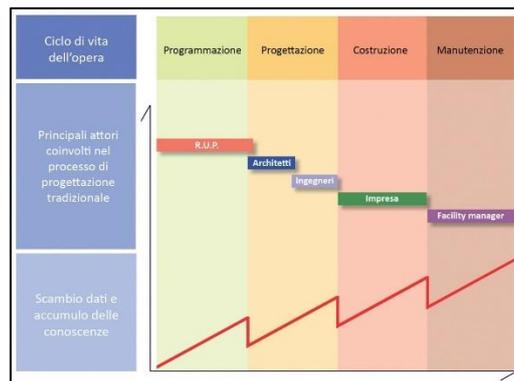


Figura 117 - Schematizzazione del processo di progettazione integrata.
 Fonte: FERRARA A.; FELIGIONI E., *BIM E PROJECT MANAGEMENT. Guida pratica alla progettazione integrata*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2019.

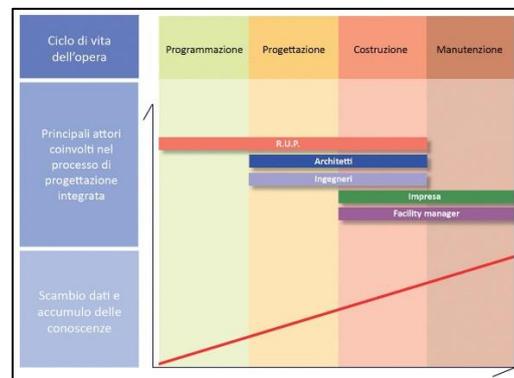


Figura 118 - Schematizzazione del processo di progettazione tradizionale.
 Fonte: FERRARA A.; FELIGIONI E., *BIM E PROJECT MANAGEMENT. Guida pratica alla progettazione integrata*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2019.

L'integrazione dei differenti saperi rende, inoltre, fondamentale l'interoperabilità tra *software*, ovvero, la capacità di scambiare dati tra applicazioni destinate a scopi specifici, riducendo la perdita o la distorsione degli stessi. Il vantaggio dell'interoperabilità è offerto dallo sviluppo di formati *file* aperti, *standard* quali l'IFC (*Industry Foundation Classes*) che, tuttavia, non sono ancora totalmente maturi da garantirlo a pieno. L'interoperabilità tra i *software*, e di conseguenza l'efficacia del formato IFC, sono, infatti, attualmente una delle criticità all'effettiva diffusione del BIM nella pratica professionale¹⁴.

5.2 La metodologia HBIM

HBIM, come definito, nel 2009, dal professor Maurice Murphy, è acronimo di *Historic Building Information Modeling*. Questo termine denota un processo applicato agli edifici storici che amplifica le possibilità del metodo BIM nato, invece, per la progettazione di nuovi organismi edilizi.

Ad oggi, tale disciplina risulta ancora poco applicata in Italia, ma è comunque tangibile la sua potenzialità per la comprensione e la conoscenza del patrimonio artistico, oltre che per l'ottimizzazione della gestione, manutenzione, restauro e, in generale, salvaguardia degli edifici storici. La normativa italiana UNI 11337, nella parte 4, difatti, è stata la prima, come illustrato nel capitolo 1, ad aver previsto dei LOD (F e G) per il patrimonio costruito.

La funzione principale del processo HBIM è quella di gestire le informazioni dei modelli intelligenti relativi a edifici esistenti. Questi modelli virtuali, come quelli BIM, sono nuclei aggregativi di dati. Ciò che li differenzia, ovviamente, è la tipologia dell'informazione; ai dati spaziali, topologici e materici, si affiancano, in questo caso, una serie di informazioni multidisciplinari e implementabili quali, ad esempio, documenti di archivio, documenti relativi alle diverse campagne di rilevamento, identificazione dello stato di conservazione e delle diverse forme di alterazione e degrado, individuazione delle diverse fasi costruttive e stratificazioni che nel tempo hanno interessato l'opera.

¹⁴ A. SCIANNA, C. CASTAGNETTI, F. MATRONE, *IL BENCHMARK SIFET 2018: Restituzione di modelli 3D/BIM/HBIM da nuvole di punti prodotte da rilievi UAV o laser scanning terrestre*, pp. 901-910, Intervento presentato al convegno 22a Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 27-29 Novembre 2018.

A fronte di una così elevata eterogeneità di informazioni e il conseguente coinvolgimento di attori dalle molteplici competenze, anche in questo caso, l'interoperabilità tra *software* specifici diventa prerogativa essenziale.

La differenza sostanziale dell'HBIM, inteso quale processo, dal BIM risiede, invece, nel particolare *workflow*. A monte di tale flusso di lavoro, infatti, è necessario disporre di una documentazione grafica, digitalizzata o non, che rappresenti la base spaziale per la modellazione del manufatto, quale nuvole di punti o disegni/elaborati storici.

In particolare, per la generazione delle nuvole di punti, calco tridimensionale della realtà, è fondamentale la fase del rilievo, effettuata attraverso l'utilizzo di tecnologie ad alta definizione quali fotogrammetria digitale e *laser scanner*.

Partendo da questi dati si ottiene un modello HBIM.

È da sottolineare che, spesso, la sola realizzazione geometrica di un modello HBIM richiede molto tempo, in quanto gli strumenti BIM non sono stati pensati per modellare gli oggetti di edifici storici, caratterizzati generalmente da unicità e irregolarità. La forma complessa delle parti architettoniche porta al declino dei fondamenti cardine del BIM (modello), ovvero la replicabilità dei componenti e l'uso di elementi standardizzati, per cui risulta necessaria la creazione di librerie *ad hoc* di oggetti parametrici non comuni. L'esigenza di oggetti non convenzionali per la modellazione, inoltre, è la ragione per cui il conseguimento della totale interoperabilità, già critico per il BIM, diventa una sfida ancora più impegnativa per l'HBIM.

In aggiunta, per quel che riguarda l'accurata rappresentazione dei dettagli, risulta più spinta la suddivisione in parti rispetto al BIM: la comune colonna, con l'HBIM, non può più essere considerata un'unica entità, ma viene suddivisa in base, fusto e capitello e ciascuno, a sua volta, ripartito in singoli elementi.

Nei paragrafi a seguire, come anticipato, è descritta nel dettaglio la fase di realizzazione del modello HBIM effettuata a partire dalla nuvola precedentemente ottenuta.

5.2.1 Modellazione della Cappella 17 con *Autodesk Revit*

Nel caso studio la modellazione della Cappella 17 è avvenuta per mezzo del *software Autodesk Revit 2020.2*.

Nonostante l'elaborazione dei dati del rilievo sia stata effettuata considerando una scala di rappresentazione 1:50, in realtà, la nuvola di punti a disposizione ha consentito di ottenere elaborati in scala 1:100; limitandosi alla rappresentazione delle sole superfici

dell'edificio, infatti, la nuvola è priva di informazioni adeguate a caratterizzare una scala maggiore, quali la stratigrafia del manufatto.

Il software Autodesk Revit

Autodesk Revit è uno tra i *software* BIM più usati e noti a livello internazionale e consente di sviluppare flussi di lavoro BIM completi e multidisciplinari permettendo l'interscambio informativo tra le discipline coinvolte. È un applicativo *object-based*, tipico dei *software* BIM, ovvero utilizza oggetti parametrici, detti famiglie, caratterizzati da reciproche relazioni, per la rappresentazione dei componenti edilizi. Tali oggetti, inoltre, appartengono a specifiche categorie definite in base alle funzionalità che svolgono all'interno del progetto.

È importante specificare che *Revit* presenta diversi ambienti di lavoro:

- *Ambiente delle Famiglie* o *Editor delle Famiglie* in cui vengono creati i componenti personalizzati. Al suo interno sono disponibili strumenti per la modellazione e la modifica di tali elementi;
- *Ambiente del Progetto* in cui vengono assemblati e creati gli elementi che compongono l'edificio;
- *Ambiente degli Elementi Bidimensionali*;
- *Ambiente delle Masse concettuali* orientato alle forme libere.

L'organizzazione delle Famiglie, inoltre, è strutturata secondo tre tipologie differenti. Si individuano:

- *Famiglie di sistema* che comprendono gli elementi primari generalmente utilizzati per rappresentare gli edifici come muri, tetti, pavimenti e scale oltre che livelli, griglie strutturali e quote. Questa categoria di famiglie viene generata e salvata direttamente all'interno dell'ambiente di progetto e non prevede un'elaborazione di tipo "grafico" ma è modificabile solo attraverso parametri predefiniti;
- *Famiglie caricabili* sono, essenzialmente, elementi caratterizzati da un livello di personalizzazione elevato. La loro creazione avviene, partendo da specifici *file* di modello, nell'*Editor delle Famiglie*, pertanto devono essere "caricate" all'interno dell'ambiente di progetto;
- *Famiglie Locali* rappresentano elementi specifici e unici con una definizione grafica simile a quella delle famiglie caricabili ma la loro creazione avviene all'interno del progetto. È possibile posizionarle su specifiche categorie

assumendo le caratteristiche delle stesse. L'unico limite di questa categoria di famiglie è quello di gravare in maniera considerevole sulle prestazioni del *software*, in quanto incide notevolmente sulle dimensioni del *file*.

Il nome *Revit* deriva da “*Revise instantly*” ovvero “revisione istantanea”, infatti, in quanto *software* BIM, ogni modifica a un elemento del modello viene aggiornata in tempo reale in tutte le viste, oltre che nell'abaco automaticamente prodotto.¹⁵ Da ultimo, ma non meno importante, *Autodesk Revit* garantisce la piena interoperabilità con altri *software* della famiglia *Autodesk* e l'esportazione e importazione dei dati nel formato di interscambio *standard IFC*.

5.2.2 Modello federato esistente e importazione della nuvola di punti

Il nucleo del modello HBIM dell'intero complesso di cappelle del Sacro Monte di Varallo è rappresentato da un modello federato realizzato nell'elaborato di Tesi Magistrale dallo studente Francesco Coniglione. La realizzazione di quest'ultimo, è una traduzione del concetto di BIM quale approccio integrato, infatti, il modello federato in questione, non è che un *file* centrale a cui sono collegati i modelli delle singole cappelle costituenti il sistema del Sacro Monte. Lo studente ha georeferito e collegato, all'interno di questo *file*, i modelli già realizzati, illustrando le operazioni da effettuare per l'inserimento di nuovi modelli nello stesso. Con l'intento di collegare anche il modello della Cappella 17, secondo quanto riportato dallo studente, la modellazione è stata effettuata in un nuovo Progetto Architettonico in cui sono state impostate le seguenti coordinate del punto base di progetto [Figura 119]:

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



Figura 119 - Coordinate punto base di progetto.

¹⁵ SIMONE POZZOLI, MARCO BONAZZA, WERNER STEFANO VILLA, *Revit 2019 per l'architettura. Guida completa per la progettazione BIM. Tecniche nuove.*

È da evidenziare che, con la versione del *software Revit* utilizzata, è stata rimossa la funzione di *clip* sul punto base del progetto, in modo che sia sempre spostato in modalità *unclip*.¹⁶

Si è proceduto all'inserimento nel progetto delle sottoregioni della nuvola di punti in formato .rcp, avendo cura di aggiungere la prima selezionando, nel menù a discesa della voce *Posizionamento*, l'opzione *Automatico: da origine a origine* e le restanti scegliendo *Automatico: da origine ad ultimo posizionamento* [Figura 120].

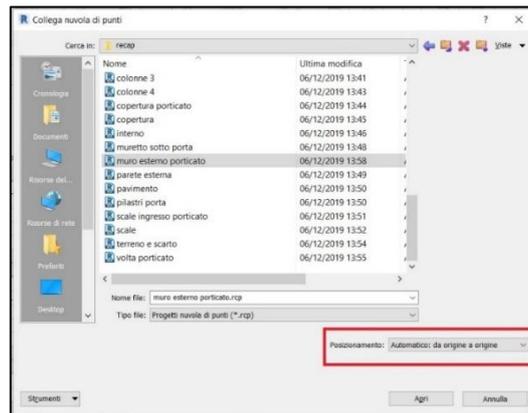


Figura 120 - Finestra di selezione delle sottocategorie della nuvola di punti.

Come si può notare dall'immagine seguente [Figura 121], nonostante la modifica delle coordinate del punto di progetto, la posizione della nuvola georeferita risulta comunque lontana dallo stesso. Questa configurazione ha reso poco agevole la fase di modellazione, ma si è preferito non apportare ulteriori modifiche alle coordinate del punto base per non incorrere in inconvenienti al momento dell'inserimento della Cappella 17 nel modello federato.

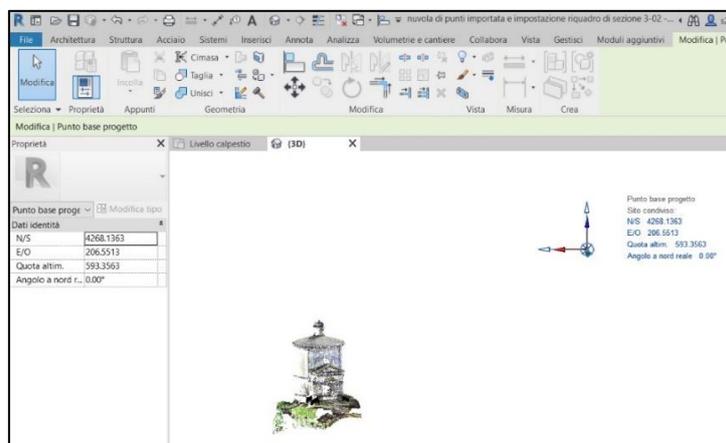


Figura 121 - Posizionamento della nuvola di punti rispetto al punto base di progetto di Revit.

¹⁶ <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/RevitReleaseNotes/files/2020updates/2020-2/RevitReleaseNotes-2020updates-2020-2-Enhancements-2020-2-html.html>

Dopo aver organizzato, quindi, l'ambiente di lavoro, creando i principali livelli di riferimento e impostando adeguatamente le viste di prospetto, l'intera nuvola, come da prassi, è stata utilizzata quale traccia geometrica su cui fondare il lavoro di modellazione della cappella [Figura 122 e Figura 123].

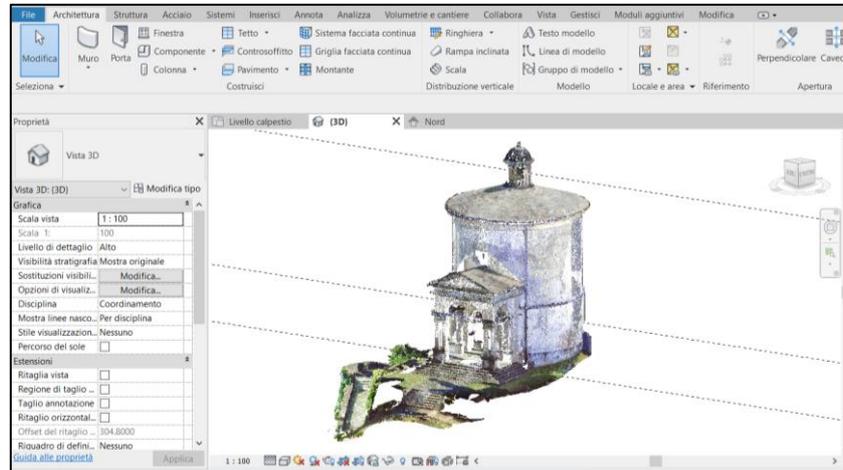


Figura 122 - Visualizzazione della nuvola di punti nella vista 3D.

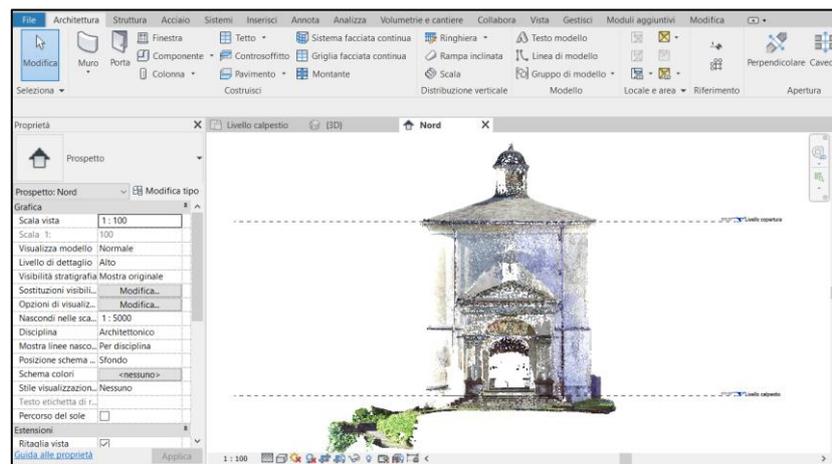


Figura 123 - Visualizzazione della nuvola di punti nella vista prospettica Nord.

Risulta, tuttavia, importante sottolineare che l'importazione della nuvola di punti è possibile solo nell'Ambiente del Progetto del *software Revit*, ma non nell'*Editor delle Famiglie*.

5.2.3 Le famiglie di sistema nel modello

Oggigiorno esistono *plug-in* di *Revit* in grado di modellare oggetti, in modo semi automatico, dalla sola lettura e analisi della nuvola di punti; tuttavia questi approcci non sempre permettono una restituzione del tutto soddisfacente e inoltre si tratta di

estensioni con versioni di prova dalla durata limitata e che necessitano di licenze di attivazione.

Si è scelto, dunque, di modellare la cappella oggetto di studio con i soli strumenti base messi a disposizione dal *software Revit*, operazione che permette una definizione abbastanza dettagliata e verosimile del modello.

Considerato il limite delle famiglie locali, accennato in precedenza, si è scelto di modellare, quanto più possibile, gli elementi architettonici principali, non caratterizzati da evidenti irregolarità, facendo uso delle famiglie di sistema.

In particolare, dopo aver sezionato con piani la nuvola di punti, in modo da poter generare viste significative che permettessero di ricalcare, estrapolare misure e individuare la quota precisa degli elementi, si è proceduto alla realizzazione, per mezzo delle famiglie di sistema, delle scale d'ingresso dell'edificio, del pavimento, delle murature del pronao e del lanternino e della copertura del pronao.

Per le murature del pronao, sono stati generati diversi tipi a seconda dello spessore ricavato dalla nuvola di punti, quest'ultima ha fatto da calco per il disegno dei profili e, inoltre, il cornicione è stato inserito come trabeazione dei muri stessi [Figura 124].

Nel medesimo modo sono stati realizzati anche i muri del lanternino.

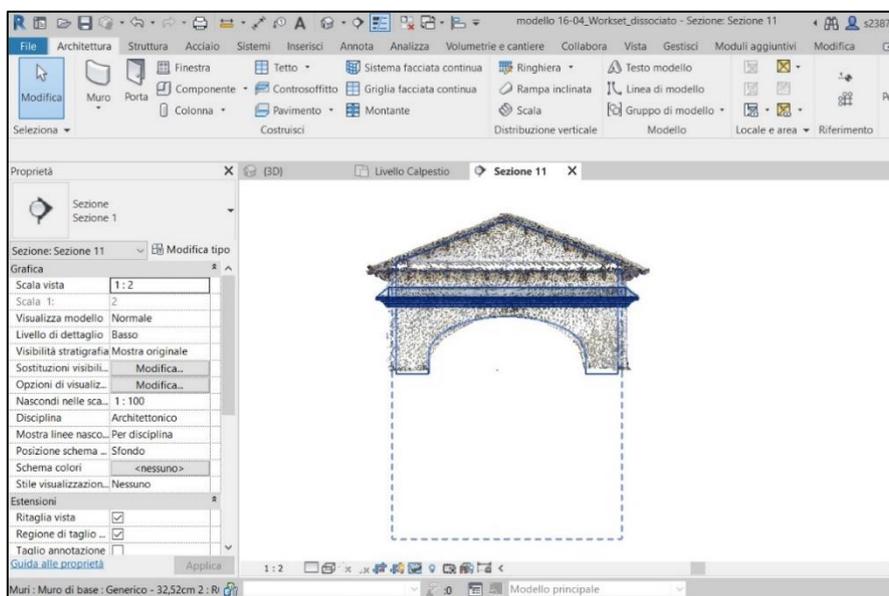


Figura 124 - Vista del profilo del muro frontale del pronao ottenuto dal calco della nuvola di punti.

Per quanto riguarda la modellazione della pavimentazione interna si è ipotizzato lo spessore del solaio in quanto ignoto, stessa linea si è utilizzata per la copertura del pronao realizzata mediante il comando *Tetto da perimetro*, selezionando i muri

perimetrali e impostando la pendenza delle due falde sempre seguendo la geometria della nuvola.

Le scale di accesso al pronao, ancora, sono state modellate come tre *Scale gettate in opera* [Figura 125], di cui sono stati disegnati singolarmente gradini e bordi.

Alla scala frontale, per di più, è stato aggiunto anche il pianerottolo [Figura 126].

La tipologia costruttiva delle scale “gettata in opera” è stata scelta in quanto, tra le tre opzioni presenti in *Revit* (Scala prefabbricata, Scala assemblata e Scala gettata in opera), risultava la più idonea a quella originale della cappella.

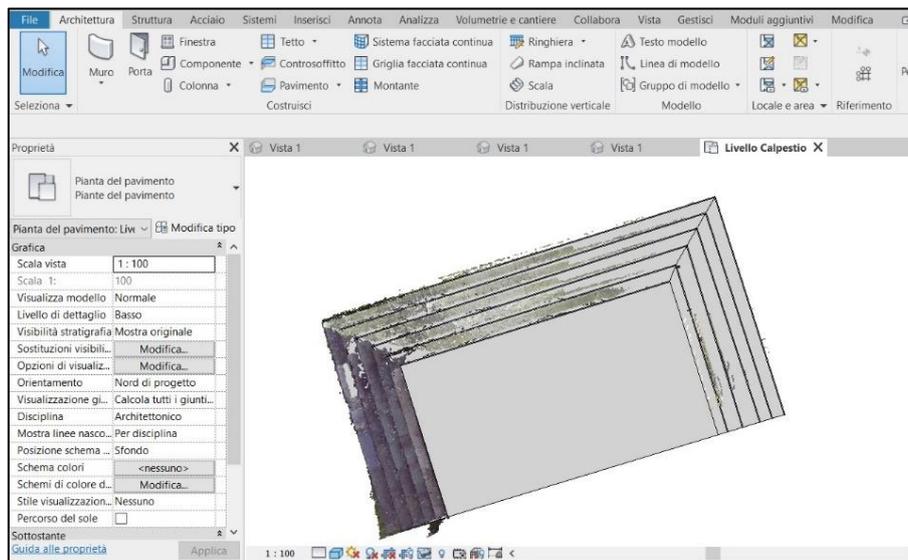


Figura 125 - Vista planimetrica delle scale di accesso al pronao.

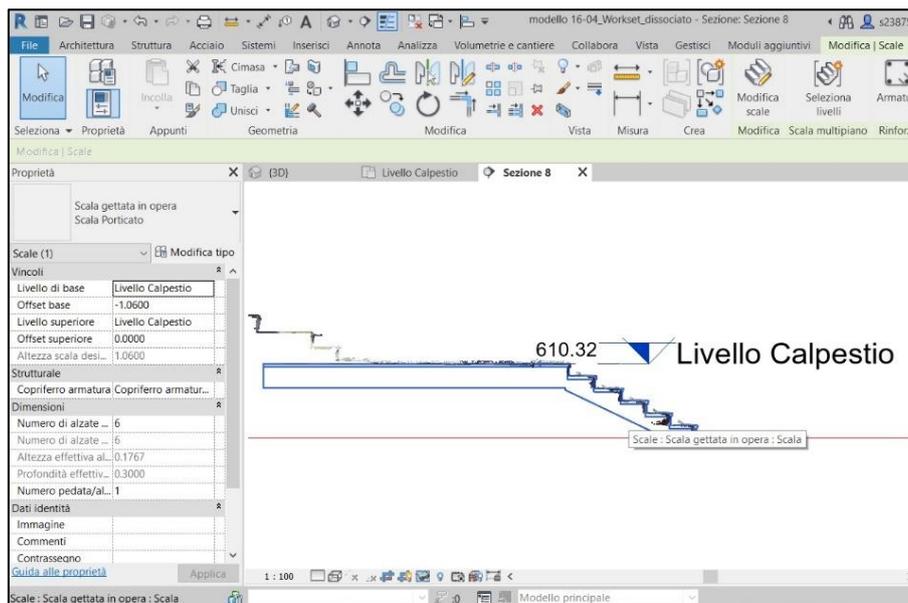


Figura 126 - Vista di sezione delle scale di accesso al pronao.

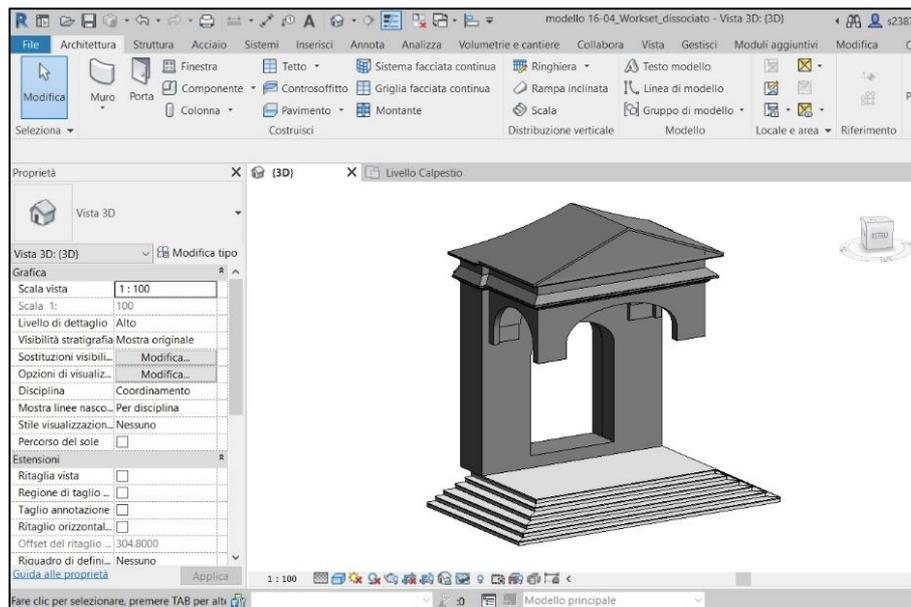


Figura 127 - Vista 3D della maggior parte dei componenti realizzati come famiglie di sistema.

5.2.4 Le famiglie locali nel modello

Nel lavoro di modellazione, come accennato, l'utilizzo delle famiglie locali è stato limitato al minimo indispensabile e in particolare a elementi estremamente irregolari e che difficilmente si sarebbero potuti ripetere in modo uguale.

Il vantaggio di tali famiglie è quello di permettere un'elaborazione grafica per la realizzazione di elementi altamente personalizzabili, come le famiglie caricabili, ma a differenza di quest'ultime possono comportarsi come un lucido sulla base della nuvola di punti. Inoltre, hanno la peculiarità di poter posizionare gli oggetti su specifiche categorie, il che equivale a una adeguata interazione con gli altri elementi, permettendo una perfetta integrazione tra famiglie locali e famiglie di sistema.

Questa tipologia di famiglia, nel caso oggetto di studio, è stata utilizzata per la modellazione del muro perimetrale e della copertura dell'edificio circolare principale, oltre che per la copertura del lanternino e della parete interna rappresentante il monte Tabor.

Nel dettaglio, l'edificio circolare risulta essere costituito da un muro perimetrale rastremato e leggermente fuori piombo terminante con una cupola interna e un oculo. Considerato che *Revit* è nato ed è stato ottimizzato per la progettazione di edifici nuovi e, quindi, non consente di modellare oggetti simili in maniera automatica, l'alternativa più celere e valida trovata per la realizzazione di questo componente è stato il comando *Rivoluzione* del motore di modellazione delle famiglie locali.

Si è, dunque, categorizzato come *Muro* il componente locale, in modo da poter essere riconosciuto anche come *host* da porte e finestre, e delineato l'asse di rivoluzione e la forma chiusa da ruotare.

Il tutto è avvenuto, ovviamente, solo dopo la realizzazione di una sezione e del relativo piano di riferimento passanti per il centro dell'oculo [Figura 128].

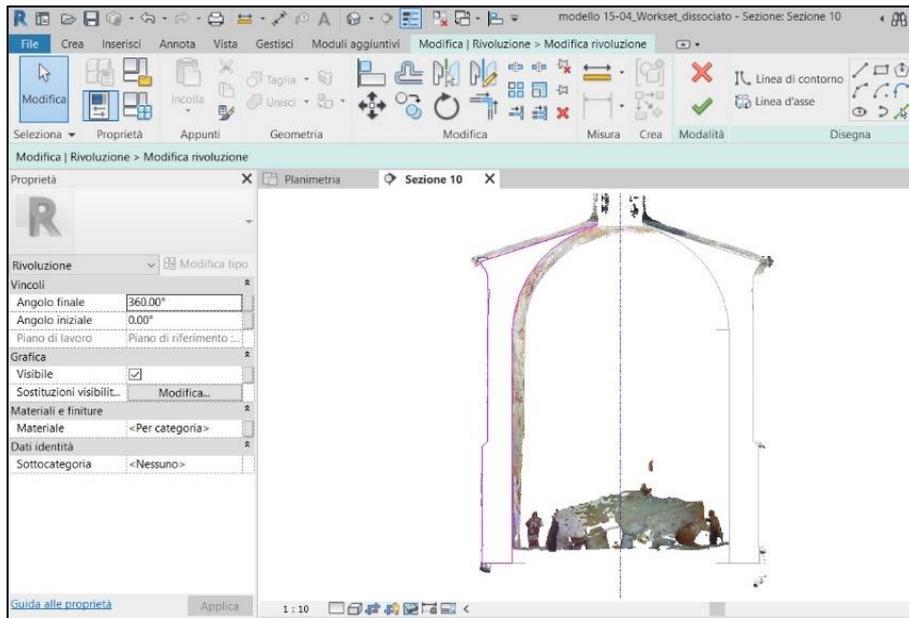


Figura 128 - Vista di modifica della famiglia locale "Muro Edificio circolare".

Analogo procedimento è stato utilizzato per la modellazione delle due coperture, alle quali, però, è stata attribuita la categoria attinente *Tetti* [Figura 129 e Figura 130].

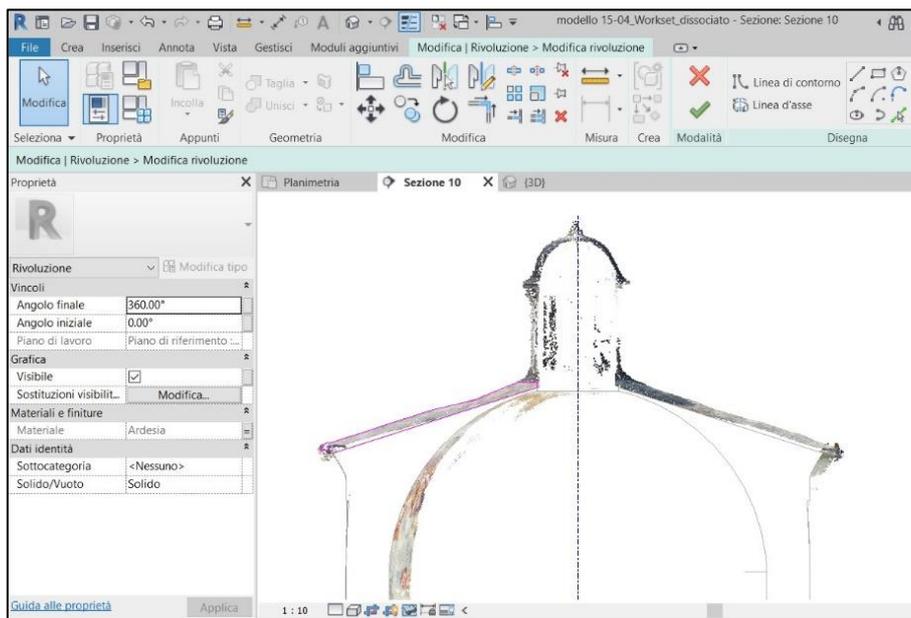


Figura 129 - Vista di modifica della famiglia locale "Copertura Edificio Circolare".

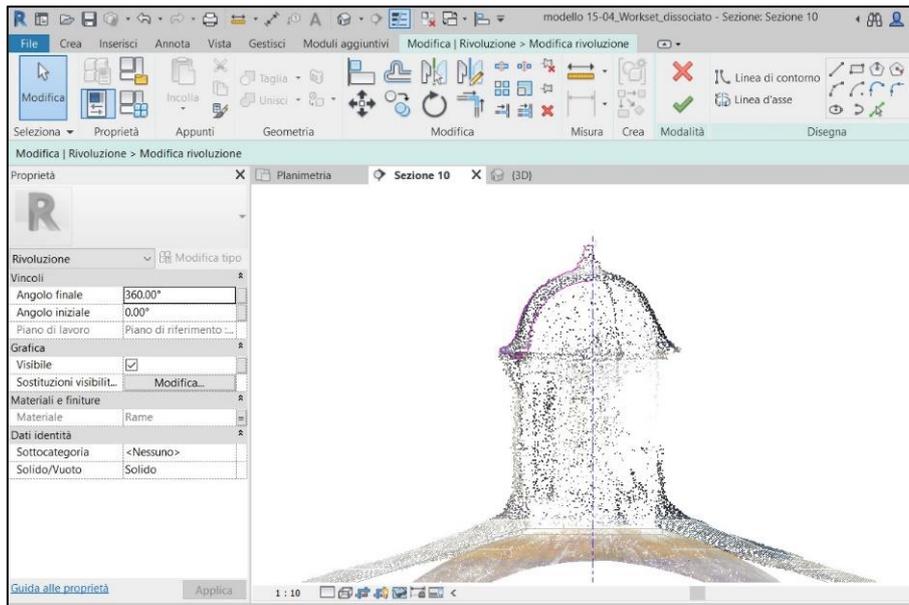


Figura 130 - Vista di modifica della famiglia locale "Copertura Lanternino".

Per quanto concerne la modellazione del muro interno, rappresentante il Monte Tabor, si è cercato di ricalcare indicativamente la nuvola di punti, utilizzando lo strumento *Unione*. In via preliminare, sono state generate diverse sezioni verticali e i relativi piani di riferimento, successivamente, ponendosi nelle diverse viste di sezione e impostando il piano attinente, sono stati disegnati i profili unendone due per volta [Figura 131].

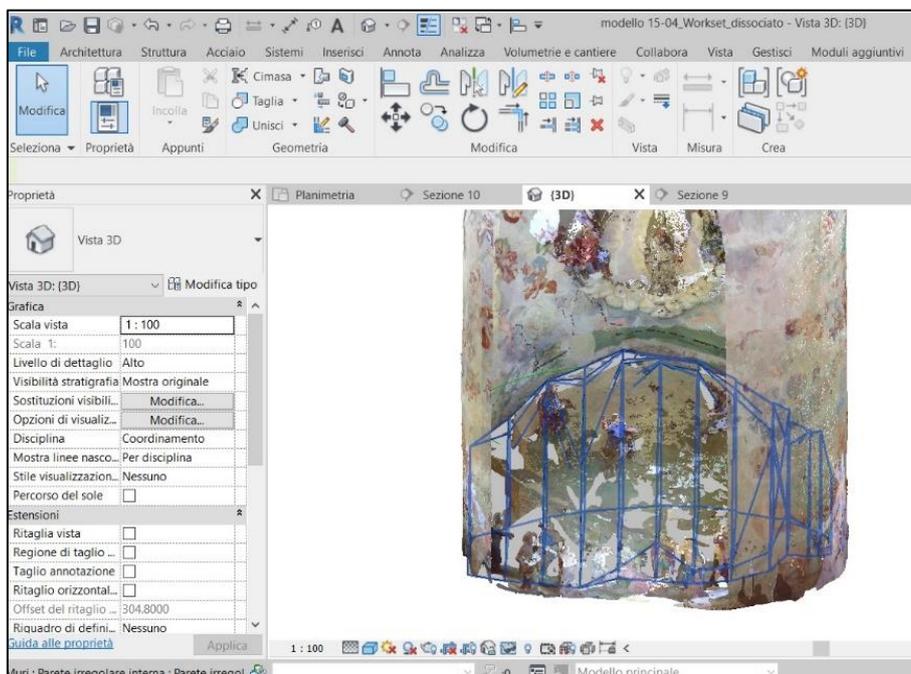


Figura 131 - Vista 3D della famiglia locale "Monte Tabor" generata per unione.

5.2.5 Le famiglie caricabili nel modello

Nella modellazione della cappella, le famiglie caricabili, generate da modelli generici metrici, sono state utilizzate per la rappresentazione di elementi di dettaglio, creando oggetti molto versatili.

Una delle peculiarità di questa tipologia di famiglie, infatti, consiste nella possibilità di assegnare dei parametri geometrici (diametro di base e altezza delle colonne, inclinazione del taglio dei modiglioni ecc.) che consentono di guidare forme e proporzioni all'interno del modello, rendendo, nel caso in esame, gli oggetti modificabili in base alla nuvola di punti. Questo modo di operare ha consentito di colmare il limite del *software* riguardante l'impossibilità di importare la nuvola di punti all'interno dell'*Editor delle famiglie*. Nello specifico, una volta posizionato correttamente nell'ambiente di progetto ciascun elemento, è possibile cambiare i valori dei parametri in modo da consentirne la coincidenza con la nuvola di punti. In aggiunta, ulteriore accorgimento, in particolare per gli elementi più dettagliati, è stato quello di sfruttare l'interrogabilità della nuvola nell'ambiente di progetto per ottenere misure geometriche e profili precisi dei diversi solidi.

Caso emblematico di famiglia caricabile, in questo progetto, creata a partire da modelli generici metrici, è quella realizzata per la rappresentazione dell'insieme: colonne ioniche binate, basamento e architrave [Figura 132]. Questa è stata generata come una famiglia *host* (ospitante) in cui sono state nidificate le tre famiglie *Colonna*, *Basamento*, *Architrave*. La suddetta scelta è giustificata dall'utilizzo ripetuto della famiglia *Colonna*. A sua volta, quest'ultima, è ancora famiglia *host* per le famiglie *Base colonna*, *Capitello* e *Fusto colonna*.

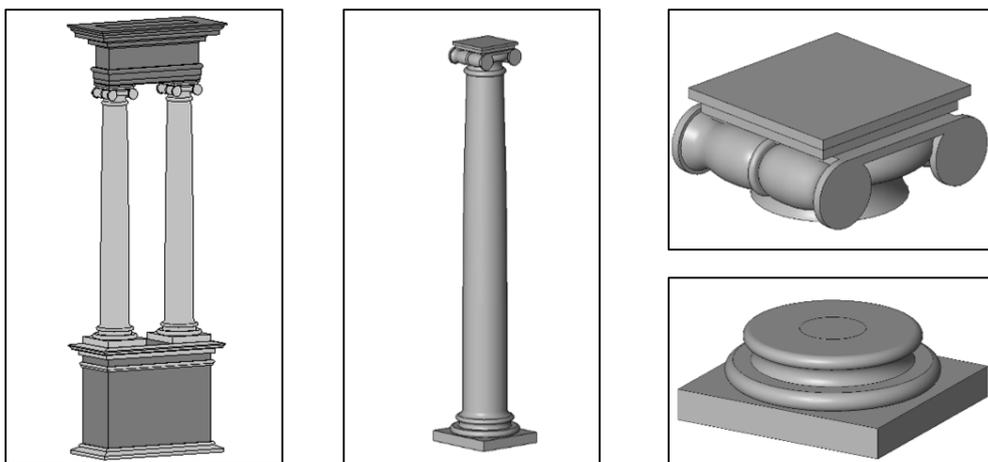


Figura 132 - Famiglia caricabile delle Colonne ioniche binate e relativa suddivisione in parti.

Per un'accurata modellazione di ciascuna di queste famiglie, a causa della difficile intelligibilità di un così elevato grado di dettaglio dalla nuvola di punti utilizzata (non contemplato dai requisiti iniziali di acquisizione dei dati), è stato necessario riprendere risorse relative agli ordini classici, al fine di comprendere maggiormente come costruire le principali forme degli oggetti in questione.

Da ciò, si è potuto rievocare come il concetto di parametrico avesse la sua massima espressione nelle diverse regole costruttive degli ordini classici, in cui ogni elemento dipende dall'altro secondo un preciso rapporto proporzionale. Rifacendosi a Vitruvio, si è scelto, dunque, di modellare le diverse famiglie in modo che il fulcro di tutte le componenti fosse il parametro *Diametro Base*, ovvero il diametro della colonna stessa misurato alla base.

Tale parametro è stato usato nelle formule di tutti gli altri parametri in modo da stabilire le relazioni desiderate e, quindi, da guidare la scala e le proporzioni dell'intero oggetto.

La creazione di questa famiglia è avvenuta attraverso l'utilizzo di regole e vincoli, nonché mediante la definizione di relazioni tra i parametri per mezzo di multipli del *Diametro Base*, stabilendo un forte legame tra riferimenti, vincoli e geometrie solide e vuote [Figura 133].

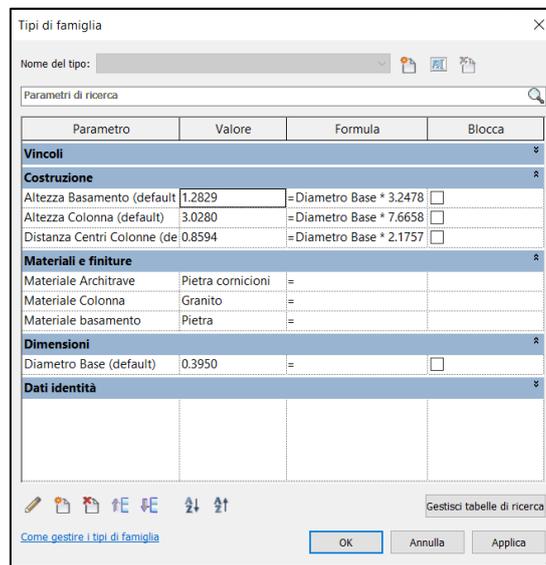


Figura 133 - Parametri della famiglia "Colonna + Basamento".

Ulteriore elemento di dettaglio, modellato con l'uso di questa tipologia di famiglie, e per cui sono stati impiegati in maniera efficiente i parametri, è quella rappresentante i *Modiglioni* posti a sostegno della cornice della copertura [Figura 134]. Per questo componente, generato a partire da un modello generico metrico basato su muro, è stato

utile impostare un parametro di tipo “Angolo” e controlli di inversione, al fine di modificare facilmente il taglio superiore del modiglione stesso e il relativo orientamento in base all’inclinazione della copertura [Figura 134].

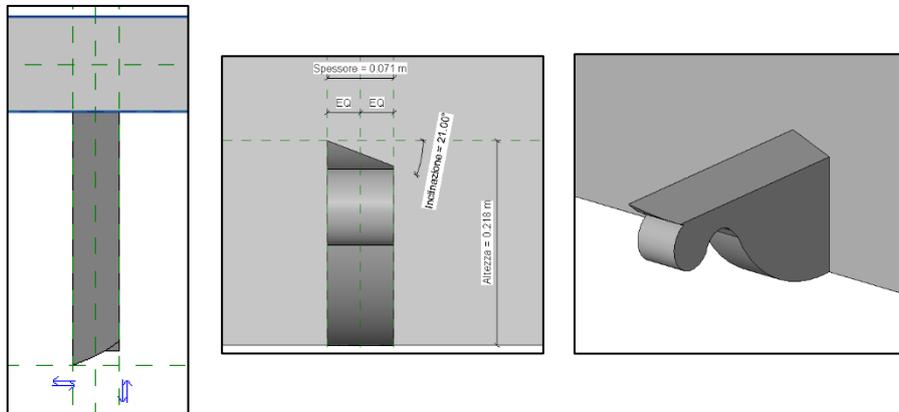


Figura 134 - Vista 3D, prospettica, di pianta con parametri e controlli di inversione della famiglia caricabile "Modiglione".

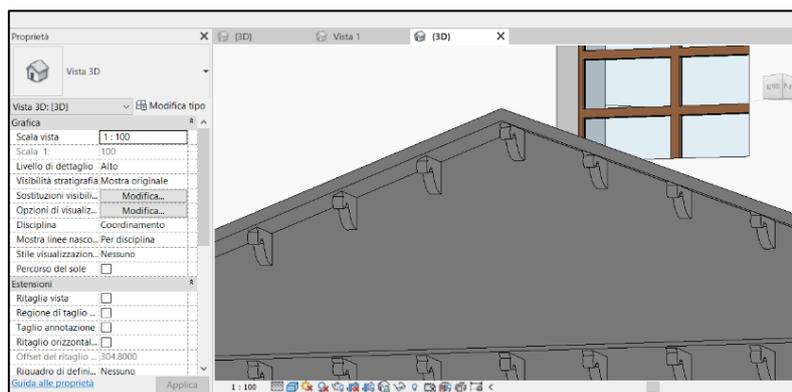


Figura 135 - Posizionamento dei "Modiglioni" in ambiente di progetto.

Infine, sono ancora famiglie caricabili, generate da modelli denominati in base al tipo di famiglia (modello porta e modello finestra) e da modelli generici metrici, le porte e le finestre, oltre che gli archi e la grata in corrispondenza dell’accesso della cappella [Figura 136].

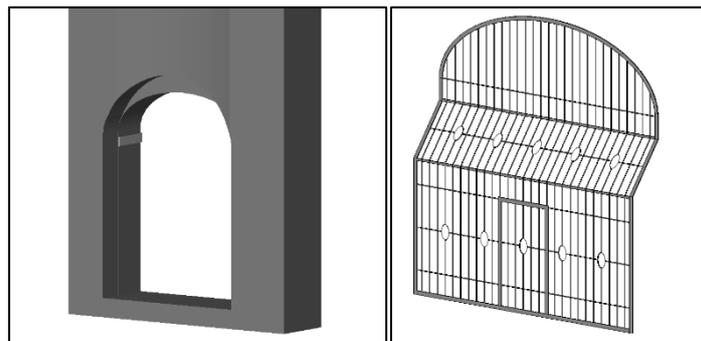


Figura 136 - Vista 3D delle famiglie "Archi porta" e "Cancello".

5.2.6 Modellazione della volta

La volta in questione è una volta a crociera a base rettangolare, data dall'intersezione di due volte a botte, caratterizzate dalla stessa altezza della chiave di volta e rispettivamente da profilo semiellittico e semicircolare. La superficie è, quindi, definita da quattro unghie a due a due simmetriche.

Il software Revit ancora non ha previsto famiglie di sistema o caricabili che permettano la modellazione automatica di un oggetto simile, per cui inizialmente è stata intrapresa la modellazione attraverso una famiglia caricabile basata su un modello generico metrico adattivo. Quest'ultima, però, è stata abbandonata in seguito a difficoltà dovute alla presenza dei due diversi profili delle volte a botte che generano la volta a crociera e dopo aver constatato il non perfetto funzionamento nei lavori di tesi precedenti.

Si è risolta, allora, la modellazione come *Muri da superficie*, nel dettaglio è stata creata una famiglia caricabile di *Massa concettuale*, parametrica, a cui gli elementi sono stati associati [Figura 137].

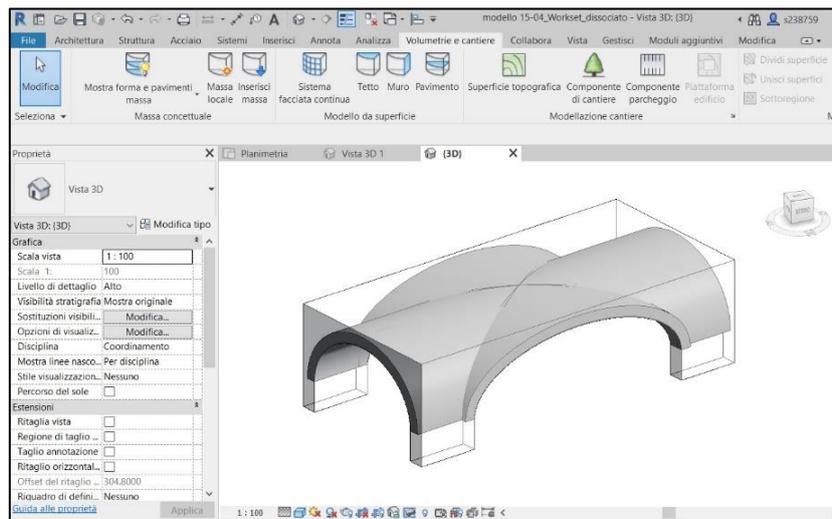


Figura 137 - Vista 3D della massa concettuale Volta e dei muri da superficie associati.

La suddetta massa si presenta, dunque, solo come supporto geometrico per i muri associati e, in un secondo momento, è possibile nascondere la vista o eliminarla del tutto dal progetto.

Tale tipo di famiglia ha diversi vantaggi tra i quali quello di poter essere utilizzata in progetti differenti dall'attuale, di non appesantire il progetto in termini di dimensioni e di poter effettuare la modellazione isolata, ovvero in un ambiente esterno dal contesto, pur permettendo, nell'ambiente di progetto, di modificare i valori dei parametri impostati garantendone, quindi, la coincidenza con la nuvola di punti [Figura 138].

Parametro	Valore	Formula	Blocca
Vincoli			
Prospetto di default	1.2192 m	=	<input type="checkbox"/>
Dimensioni			
Altezza (default)	2.0100 m	=	<input type="checkbox"/>
Larghezza (default)	6.6400 m	=	<input type="checkbox"/>
Profondità (default)	3.0200 m	=	<input type="checkbox"/>
d volta 1 (default)	3.3100 m	=	<input type="checkbox"/>
d volta 2 (default)	2.2200 m	=	<input type="checkbox"/>
h imposta (default)	0.5800 m	=	<input type="checkbox"/>
h volta 1 e 2 (default)	1.7300 m	=	<input type="checkbox"/>

Figura 138 - Parametri della massa concettuale “Volta”.

5.2.7 Scostamento del modello BIM dalla nuvola di punti

Gli edifici storici, come espresso nei paragrafi precedenti, sono, solitamente, caratterizzati da grandi irregolarità, inoltre, i modelli BIM, poiché nascono per la progettazione di nuove costruzioni, spesso, non riescono a rappresentare, in maniera esauriente, il manufatto reale.

Al fine di comprendere il grado di accuratezza raggiunto nella modellazione della Cappella 17, si è proceduto alla determinazione dello scostamento metrico tra il modello e la nuvola di punti, avvalendosi del *plug-in FARO As-Built for Autodesk Revit*. Quest’ultimo, prendendo come riferimento una superficie del modello e attraverso una griglia di dimensioni configurabili, permette di valutare per ogni maglia i seguenti valori di deviazione del modello dalla nuvola [Figura 139]:

- Valore medio: distanza media tra i punti della nuvola e la superficie;
- Valore minimo: distanza del punto più vicino della nuvola dalla superficie;
- Valore massimo: distanza del punto più lontano della nuvola dalla superficie;
- Valore più vicino: distanza tra il centro della cella della griglia e il punto più vicino a esso;
- Numero di punti: numero totale di punti della nuvola interni a ciascuna cella.

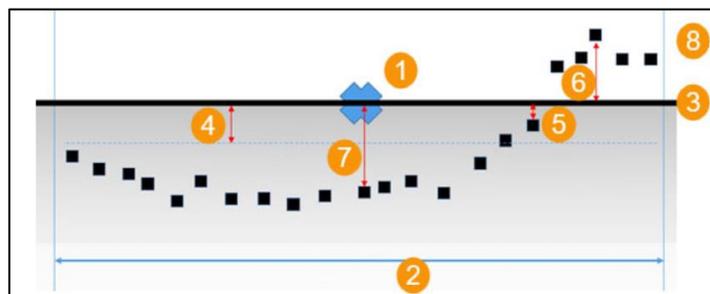


Figura 139 – Schema dei valori determinabili tramite As-Built: (1) centro della cella della griglia, (2) larghezza cella, (3) taglio superficie, (4) valore medio, (5) valore minimo, (6) valore massimo, (7) valore più vicino, (8) punti della nuvola di punti.

Fonte: Manuale d’uso As-Built for Autodesk Revit 2019.

Nel caso in esame, è stato ricavato il valore medio di distanza tra la parete esterna circolare del corpo principale e la rispettiva nuvola per mezzo dello strumento *Calcola* del menù *Analisi As-Built*.

Considerato che la nuvola di punti *laser scanner*, utilizzata per la modellazione del suddetto elemento, è stata sottocampionata a 1 cm, si è scelto di impostare la dimensione media delle maglie a 5 cm, in modo che ciascuna cella contenesse un numero di punti adeguato a ottenere un risultato soddisfacente.

Per quanto riguarda, invece, il parametro di distanza massima, entro il quale effettuare l'analisi, è stato settato pari a 30 cm, in quanto per la modellazione dell'elemento (realizzato come famiglia locale) si è riusciti, in linea di massima, a seguire il profilo della nuvola e si presume di non avere distanze superiori a questo valore [Figura 140].

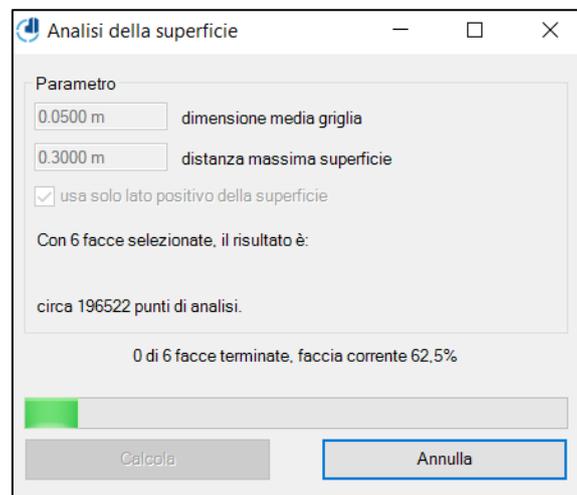


Figura 140 - Finestra di impostazione dei parametri di calcolo.

Ad analisi conclusa, viene restituito un risultato colorimetrico sul modello in funzione della sua distanza media dalla posizione dei punti della nuvola.

Il verde indica piccole distanze medie, di contro, gli scostamenti maggiori sono rappresentati con colorazione rossa e blu; in particolare, il rosso, a cui corrispondono valori di distanza positivi, indica che la posizione dei punti della nuvola è esterna rispetto alla superficie, al contrario, il blu è restituito nel caso in cui i valori sono negativi e la posizione dei punti è interna rispetto alla superficie.

Come visibile nell'immagine seguente [Figura 141], dalla modellazione non è stato possibile ottenere la stessa precisione che caratterizza la nuvola di punti.

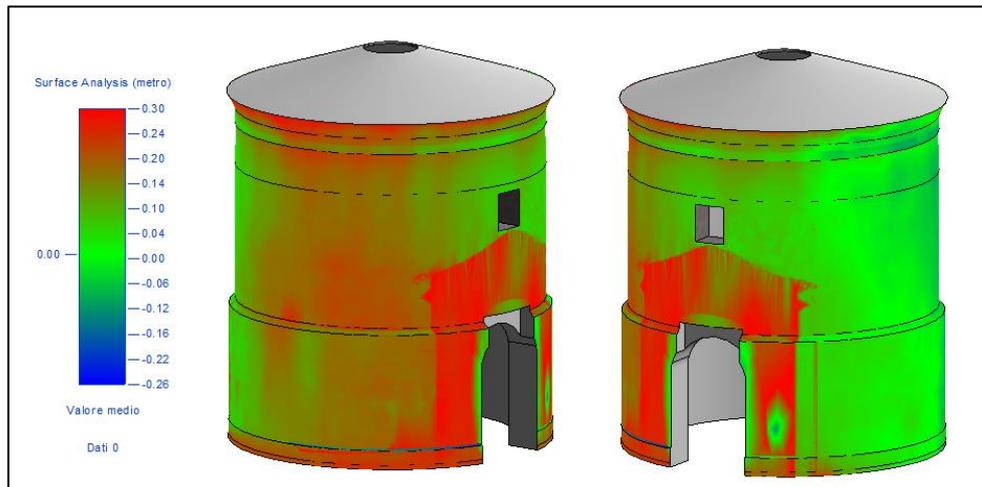


Figura 141 - Risultati analisi *As-built* sulla Parete esterna circolare.

Sulla superficie in questione è evidente una prevalenza di colorazione verde, corrispondente a uno scostamento medio entro i 4 cm (tolleranza della scala di rappresentazione), tuttavia, sono presenti anche diverse zone di colore rosso.

In particolare, quelle alla base della superficie possono essere giustificate dall'andamento irregolare del terreno presente nella nuvola, che ha comportato una difficoltà nella modellazione del basamento della parete. L'area rossa in corrispondenza dell'ingresso della cappella è dovuta, invece, all'esclusione del pronao dall'analisi. La discrepanza presente nella porzione di parete a sinistra dell'ingresso è riconducibile all'irregolarità che caratterizza i muri perimetrali dell'edificio, chiaramente visibile nella sezione in pianta riportata a seguire [Figura 142].

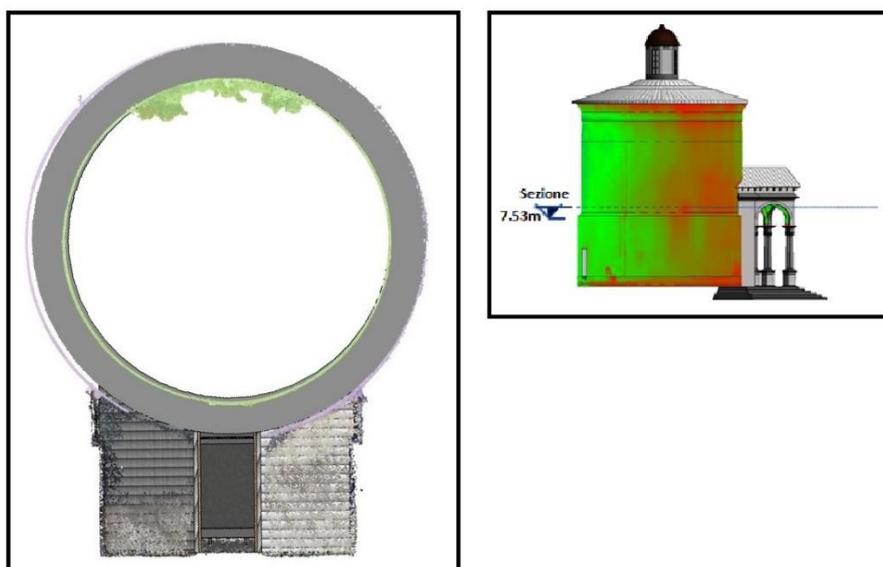


Figura 142 - Sezione con evidente irregolarità del muro perimetrale.

Nonostante la modellazione della parete rastremata sia stata effettuata cercando di attenersi il più possibile alla nuvola di punti, è emersa una differenza della porzione in questione dalla stessa nuvola di all'incirca una ventina di cm [Figura 143].

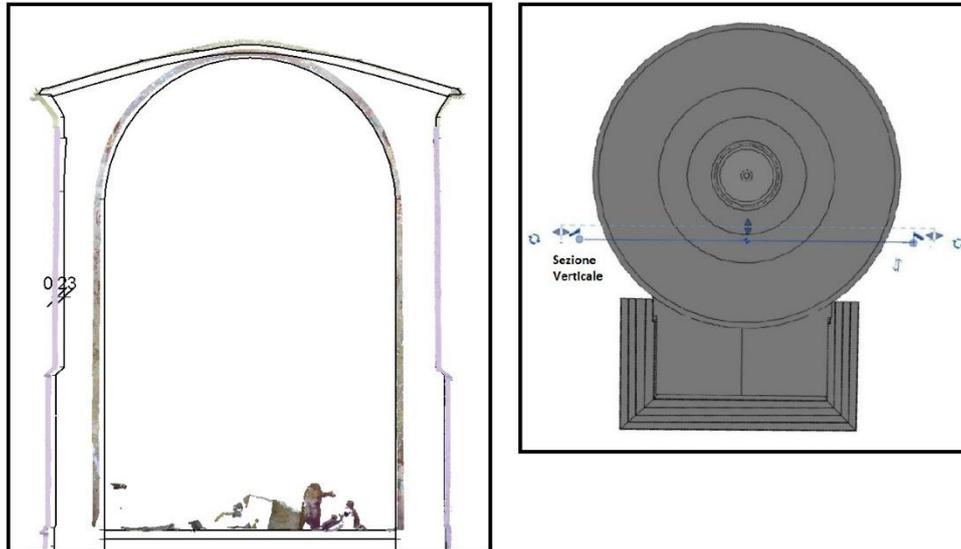


Figura 143 - Sezione verticale con evidente distanza tra la nuvola e parte di muro perimetrale del modello.

Per quel che riguarda il cordolo, la colorazione è ancora assimilabile all'irregolarità dell'edificio a cui, tuttavia, si aggiunge la probabile differenza presente tra la nuvola *laser scanner* e quella fotogrammetrica, considerato che la modellazione di tale elemento ha avuto come riferimento il prodotto del rilievo fotogrammetrico.

Analoga analisi è stata eseguita anche sulla volta del pronao, elemento dall'elevata complessità geometrica; il risultato ottenuto ha evidenziato uno scostamento al di sotto dei 4 cm [Figura 144].

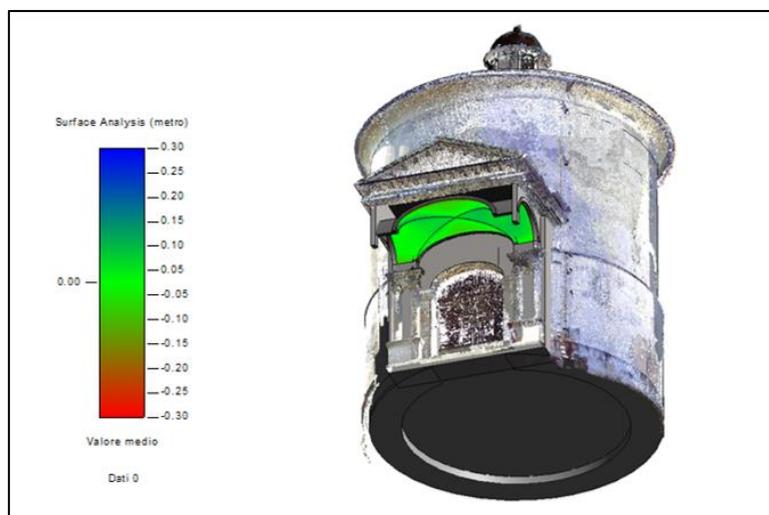


Figura 144 - Risultati analisi *As-built* sulla Volta del pronao.

5.2.8 Modellazione dell'unità volumetrica costituente la Cappella 17

Conclusa la modellazione dettagliata della Cappella 17, necessaria all'implementazione del LOD 3 del database di Main10ance, per l'inserimento dei dati relativi al LOD 2, si è proceduto, in ambiente *Revit*, anche alla realizzazione dell'unità volumetrica costituente la stessa.

La creazione è stata effettuata in un Progetto Architettonico differente dal precedente, in cui, in maniera analoga a quanto già eseguito, sono state impostate le coordinate del punto base di progetto e inserite le sottoregioni della nuvola di punti.

Seguendo la geometria della nuvola, l'unità volumetrica è stata realizzata attraverso l'utilizzo di due famiglie locali, categorizzate come *Massa*, e rappresentanti per mezzo di un parallelepipedo e due cilindri, rispettivamente, il pronao, il corpo principale della cappella e la lanterna privi di coperture [Figura 145].

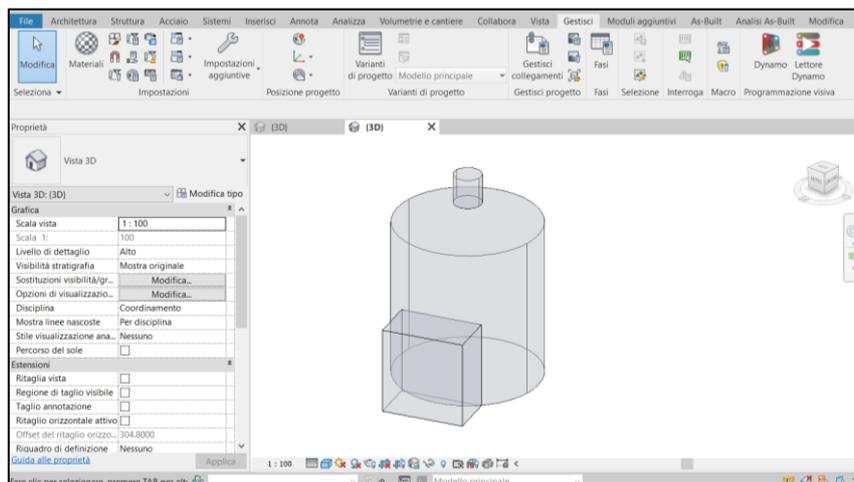


Figura 145 - Unità volumetrica della Cappella 17.

5.2.9 Inserimento del modello della cappella 17 nel modello federato esistente del Sacro Monte di Varallo

Ultimata la fase di modellazione, seguendo le indicazioni riportate sulla tesi dello studente Francesco Coniglione, è stato inserito il modello 3D della Cappella 17 all'interno del file "SMV_Coordinamento" contenente il modello federato [Figura 146]. Il collegamento è avvenuto tramite il comando *Collega Revit* e impostando, nel menù a discesa della voce *Posizionamento*, l'opzione *Automatico: da punto base progetto a punto base progetto*. Come risultato si è ottenuto, tuttavia, un posizionamento della Cappella 17 non coincidente con quello della relativa unità volumetrica con coperture, già inserita nel modello federato [Figura 147]. Al fine di

poter lavorare in maniera più agevole, infatti, il modello federato era stato realizzato sulla stessa nuvola di punti fotogrammetrica, alla quale, però, erano state maggiormente troncate le coordinate per non essere troppo distanti dal centro di progetto di *Revit*. A conferma di quanto detto, il modello della Cappella 17, inserito nel *file* di coordinamento, possiede l'analogia rotazione rispetto al nord reale del modello federato. Per ovviare a tale problematica, il Team dei Dipartimenti DIATI e DISEG ha optato per la realizzazione di un nuovo modello federato che fosse il punto zero dell'intero progetto Main10ance.

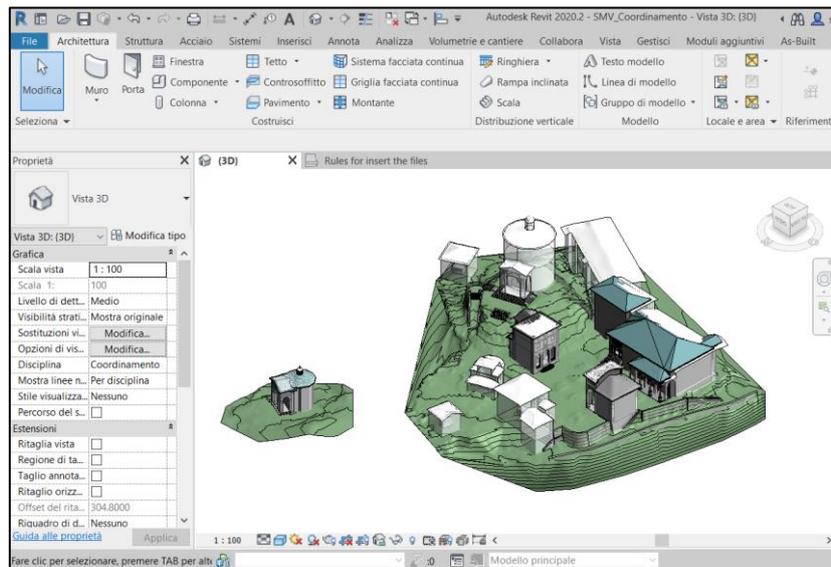


Figura 146 - File "SMV_Coordinamento".

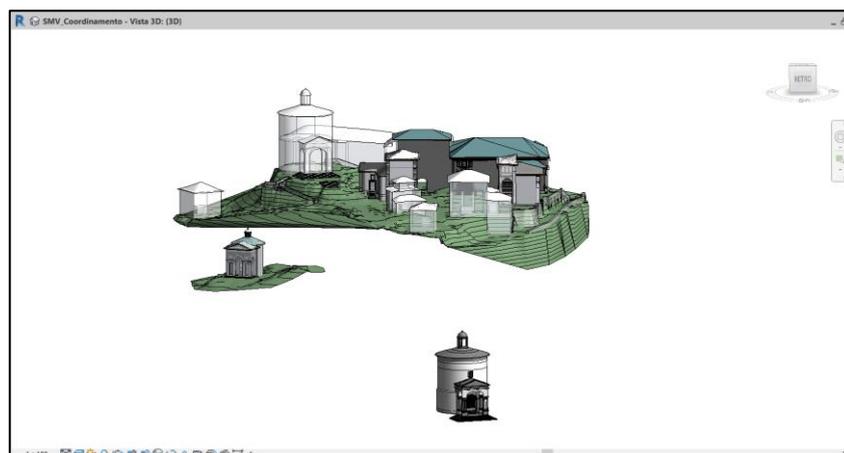


Figura 147 - Inserimento del modello della Cappella 17 nel *file* "SMV_Coordinamento".

6 Il nuovo modello federato

Come già illustrato nel capitolo precedente, il team del Dipartimenti DIATI e DISEG ha scelto di creare un nuovo modello federato sulla base di nuvole di punti a cui sono state applicate in egual modo le grandi traslazioni. Nel dettaglio, le nuvole sono state tutte traslate di:

X: - 442000.00

Y: - 5074000.00

Z: 0

Occorre specificare che si parla di nuvole di punti in quanto le coordinate sono state troncate alla nuvola fotogrammetrica originale e, in egual modo, ad altre nuvole *laser scanner*, rappresentative di porzioni del Sacro Monte non acquisite da rilievo fotogrammetrico. Infine, sono state unite e filtrate a 2 cm per realizzare un modello federato che rappresentasse l'intero complesso del Sacro Monte di Varallo [Figura 148].



Figura 148 - Nuvola fotogrammetrica iniziale (sinistra) e nuvola fotogrammetrica con aggiunta di nuvole laser scanner opportunamente traslate (destra).

6.1 Realizzazione del Modello Digitale del Terreno

All'interno del nuovo modello federato, al fine di garantire una superficie d'appoggio al complesso costruito, è stato importato il DTM.

Il DTM, acronimo di Modello Digitale del Terreno, rappresenta, attraverso l'interpolazione delle curve di livello, l'andamento della superficie topografica priva di elementi antropici e vegetazione [Figura 149].

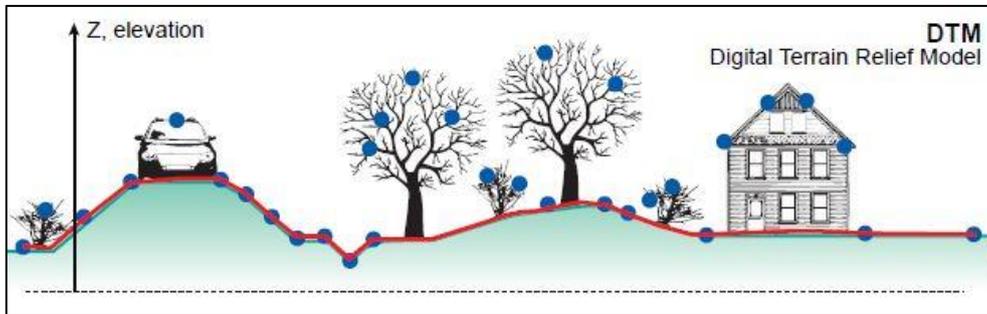


Figura 149 - Definizione di DTM.
Fonte: <https://3dmetrica.it/>

Per la realizzazione dello stesso sono stati valutati due metodi differenti come riportato di seguito.

6.1.1 Realizzazione del modello digitale del terreno tramite *CloudCompare*

In prima istanza, si è optato per una pulizia automatica della nuvola implementata mediante il *software Cloud Compare*, nel dettaglio, utilizzando il *plug-in Cloth Simulation Filter*¹⁷ e impostando i parametri come da immagine [Figura 150].

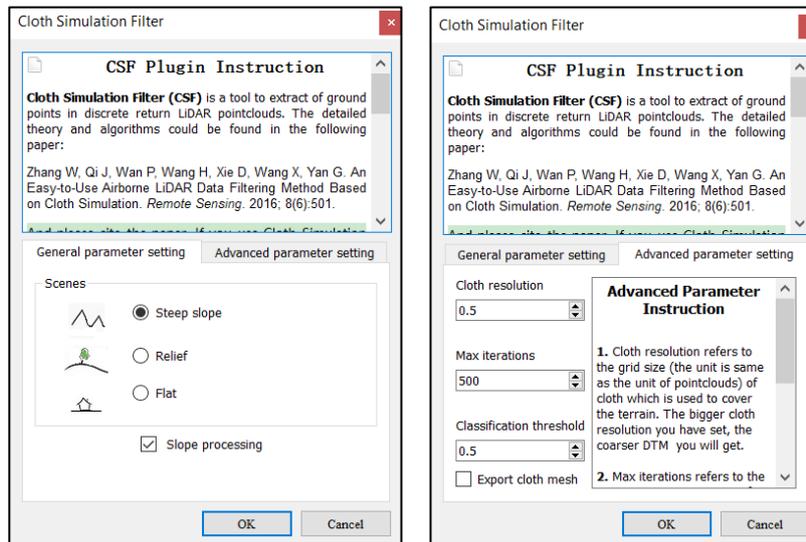


Figura 150 - Impostazione dei parametri di *Cloth Simulation Filter*.

¹⁷ ZHANG W., QI J., WAN P., WANG H., XIE D., WANG X., YAN G. *An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation*. *Remote Sensing*. 2016.

La nuvola pulita ottenuta dal processamento contava di 8242830 punti ed è visibile nell'immagine seguente [Figura 151].

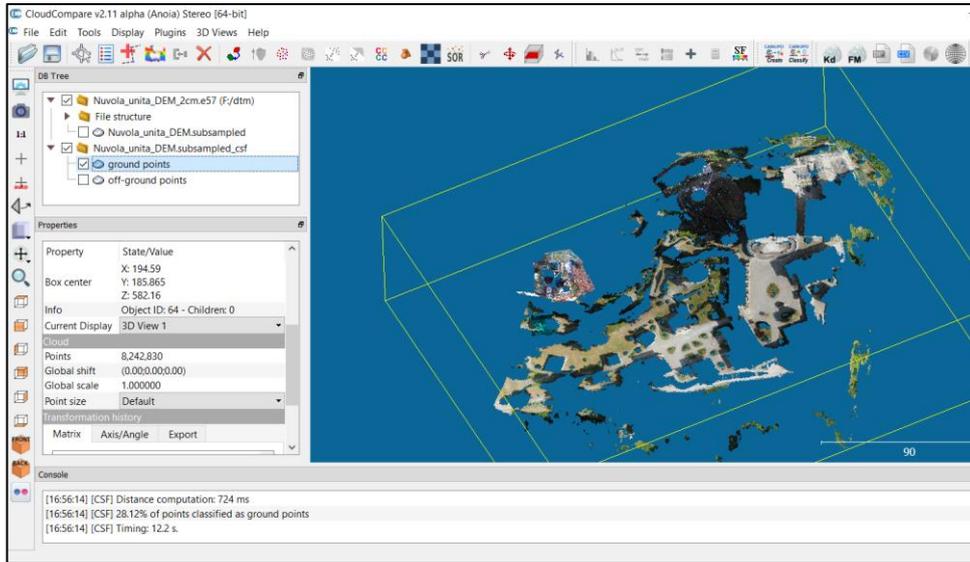


Figura 151 - Nuvola implementata pulita tramite il *plug-in Cloth Simulation Filter*.

Effettuato, quindi, un ulteriore filtraggio a 25 cm, atto a ridurre il numero di punti, la nuvola è stata esportata in formato .csv e, successivamente, importato il *file* in ambiente *Revit*, si è generato il DTM tramite la scheda *Volumetrie e cantiere* → *Superficie topografica* → *Crea da importazione* → *Specifica file di punti* [Figura 152].

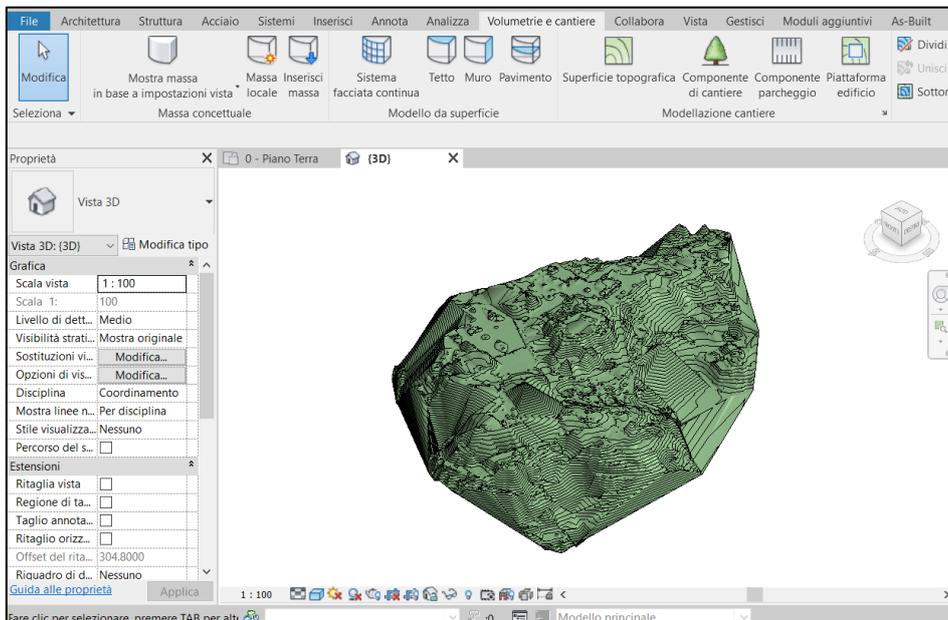


Figura 152 - DTM ottenuto tramite *software CloudCompare* e *Revit*.

Il risultato raggiunto non è stato tuttavia ritenuto soddisfacente.

6.1.2 Realizzazione del modello digitale del terreno tramite *3DReshaper*

La seconda e decisiva metodologia valutata per la realizzazione del DTM ha previsto l'elaborazione della nuvola per mezzo del *software 3DReshaper*.

Il *Software 3DReshaper*

3DReshaper è un *software* dedicato al processamento di diversi tipi di nuvole di punti, in grado di supportare *file* senza limiti di dimensione e formato. Tra la sua vasta gamma di funzionalità permette la pulizia, riduzione del rumore, separazione e unione delle nuvole.

Realizzazione del modello digitale del terreno conclusivo

Per la realizzazione ultima del DTM si è proceduto, dunque, importando la nuvola, in formato *.E57*, con semplice *drag and drop*, all'interno dell'area di lavoro di *3DReshaper*.

Attraverso lo strumento *Estrattore terreno* e settando il parametro di *Pendenza massima del terreno* pari a 45° , sono state generate la nuvola di punti attinente alla sola topografia dell'area [Figura 153] e la relativa *mesh* [Figura 154].

Dalla *mesh* sono state, infine, estratte le curve di livello e esportate in formato *.dxf* [Figura 155].

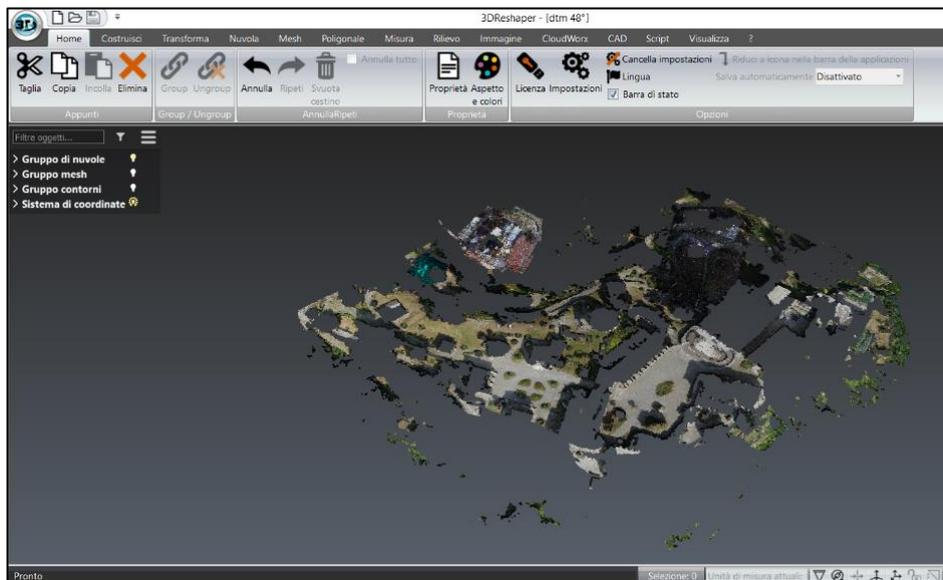


Figura 153 - Nuvola di punti pulita tramite *3DReshaper*.

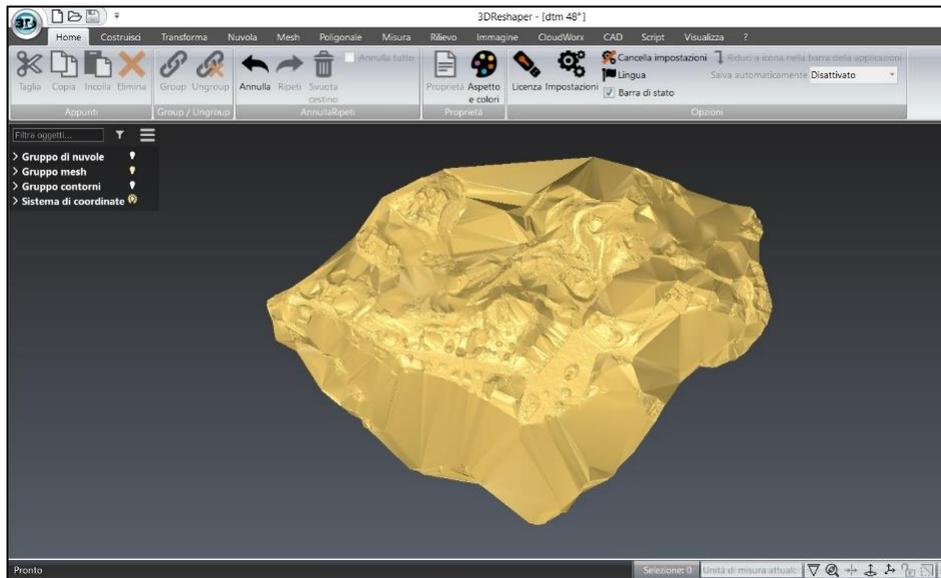


Figura 154 - Mesh della nuvola di punti pulita.

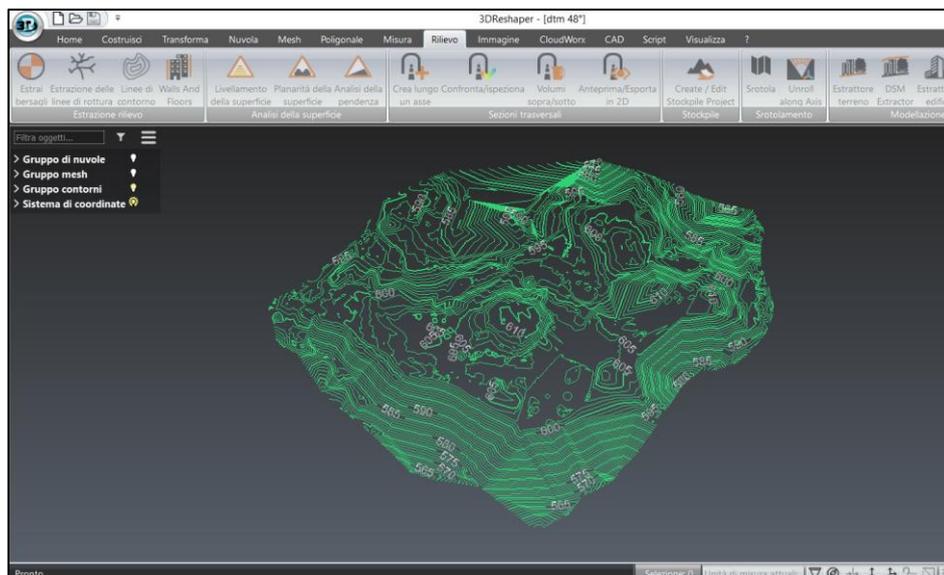


Figura 155 - Curve di livello ottenute dalla mesh della nuvola di punti.

Successivamente, quest'ultime sono state importate nel software Revit con lo strumento *Importa CAD* presente nella scheda *Inserisci*, impostando nel menù a discesa della voce *Unità di misura* l'opzione *Metri* e in quello *Posizionamento* l'opzione *Automatico: da origine a origine*.

Disponibili nel progetto i dati 3D, distribuiti già alle quote corrette, si è potuto procedere alla creazione della superficie in modo analogo a quanto fatto precedentemente, ma selezionando, in questo caso, lo strumento *Crea da istanza importata* dal menù a discesa del pulsante *Crea da importazione* [Figura 156].

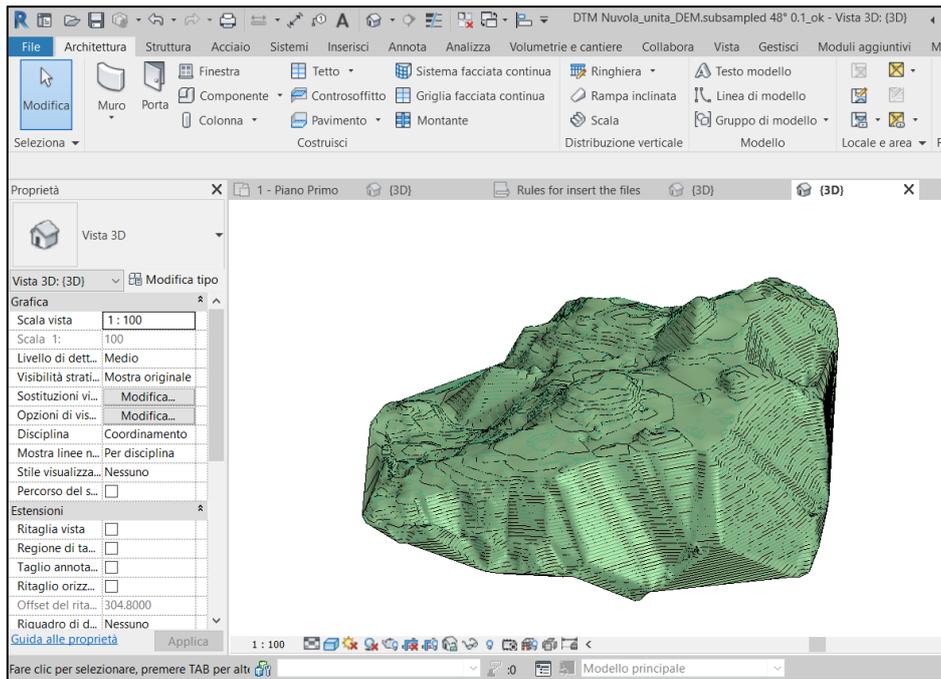


Figura 156 - DTM ottenuto tramite software 3DReshaper e Revit.

6.2 Inserimento del DTM e della Cappella 17 nel nuovo modello federato del Sacro Monte di Varallo

Il definitivo modello federato è stato realizzato a partire da un nuovo Progetto Architettonico del software Revit al cui interno, utilizzando lo strumento *Collega Revit*, sono stati posti il DTM conclusivo, il modello dettagliato della Cappella 17 e quello della relativa unità volumetrica. Per l'inserimento del DTM, nella casella *Posizionamento* è stata selezionata l'opzione *Automatico: da origine a origine*. Il modello, conservando le giuste proprietà di georeferenziazione, si è, ovviamente, collocato lontano dal punto base di progetto [Figura 157].

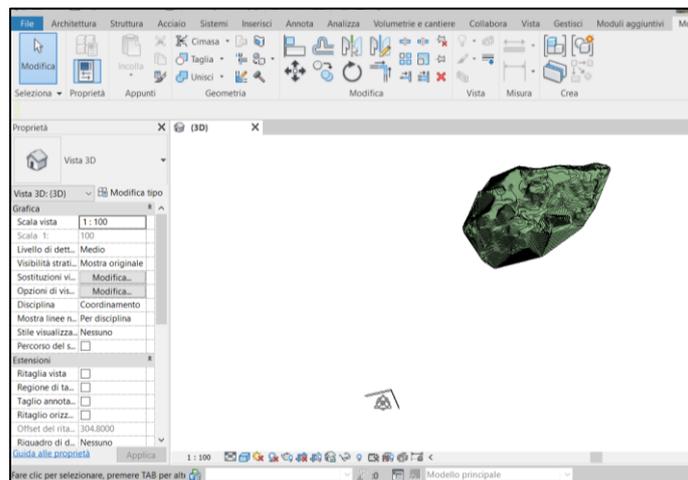


Figura 157 - Inserimento del DTM nel nuovo modello federato.

Poiché la nuvola utilizzata per realizzare i due modelli relativi alla cappella era caratterizzata da un troncamento delle coordinate differente, è stato necessario individuare sulla nuvola, rappresentativa dell'intero complesso, le coordinate di un punto dell'edificio facilmente individuabile anche nei modelli 3D della cappella; si è scelto di determinare, nel *software CloudCompare*, le coordinate di uno dei punti angolari della gradinata d'ingresso [Figura 158].

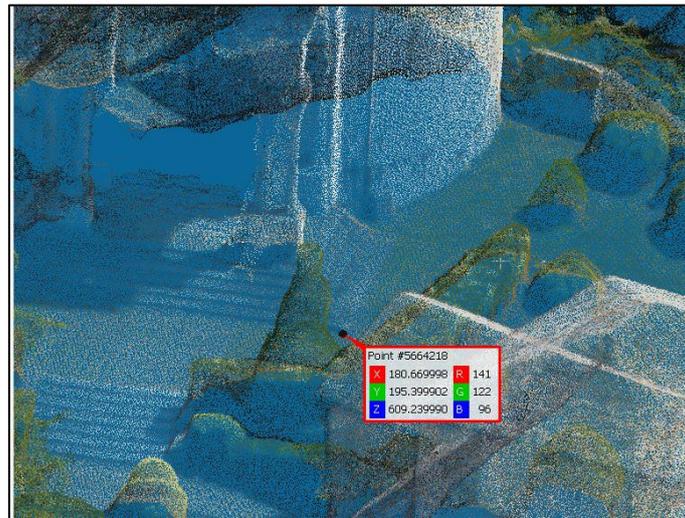


Figura 158 - Individuazione delle coordinate di un punto angolare della gradinata d'ingresso sulla nuvola.

Si è proceduto, quindi, a selezionare il punto base di progetto del *file* di coordinamento e a impostare le coordinate individuate pari a [Figura 159]:

N/S = 195.399902;

E/O = 180.669998;

Quota altimetrica = 609.239990.

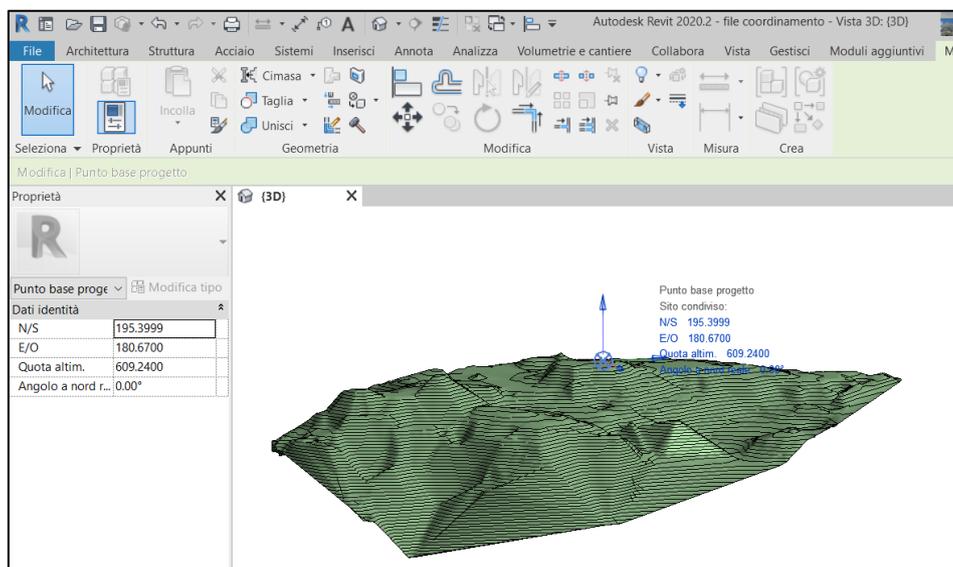


Figura 159 - Punto base di progetto del *file* di coordinamento.

Nei *file* relativi ai due modelli dell'edificio si è, invece, dovuto effettuare uno spostamento manuale del punto base cercando di farlo coincidere il più possibile allo stesso punto angolare della scala precedentemente menzionato [Figura 160].

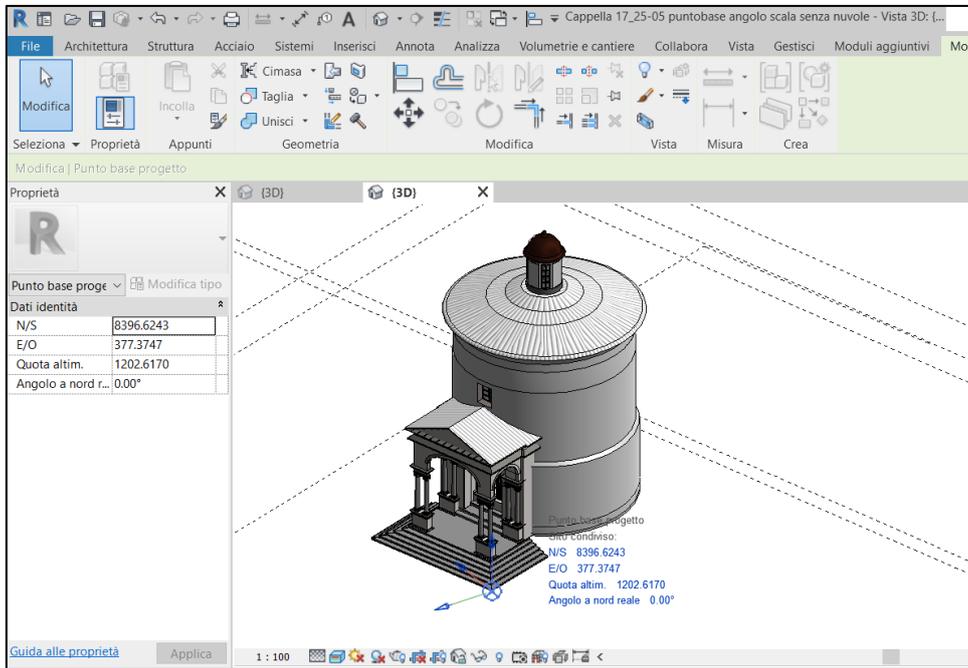


Figura 160 - Punto base di progetto del *file* della Cappella 17.

In definitiva, sono stati collegati quest'ultimi due modelli all'interno del *file* di coordinamento scegliendo, questa volta, per la casella *Posizionamento* l'opzione *Automatico: da punto base progetto a punto base progetto* [Figura 161 e Figura 162].

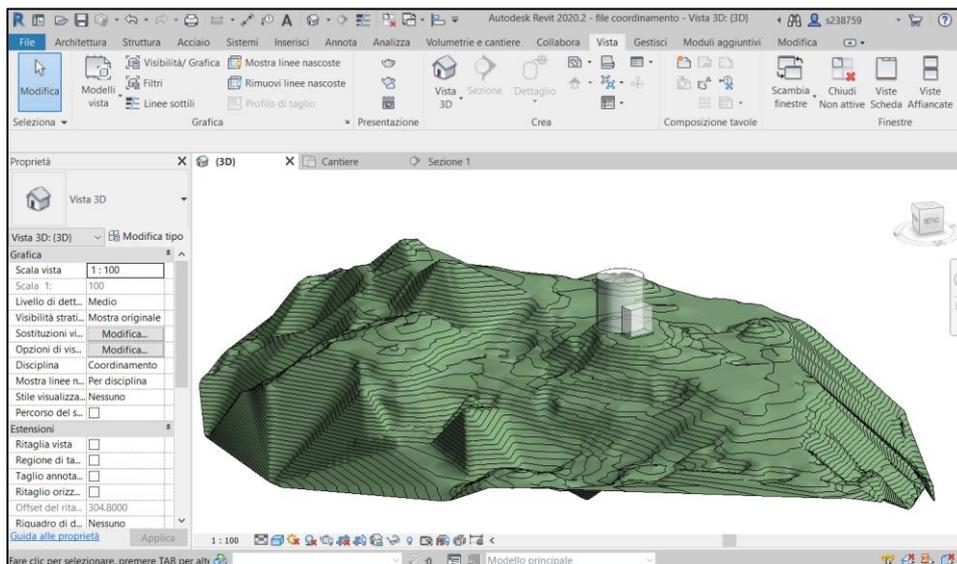


Figura 161 - Unità volumetrica e DTM all'interno del *file* di coordinamento.

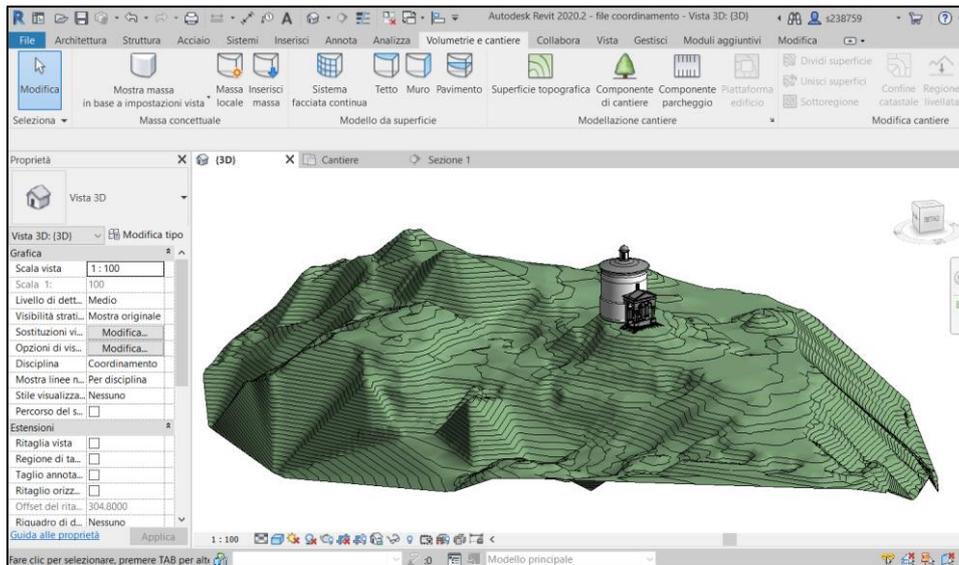


Figura 162 - Modello della Cappella 17 e DTM all'interno del file di coordinamento.

È da evidenziare che, avendo operato con nuvole di punti caratterizzate da troncamenti differenti, nel posizionamento dei due modelli, non è stato possibile raggiungere la massima precisione.

7 L'interoperabilità

La conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale, come già esposto, non può sottrarsi a una gestione integrata dei diversi aspetti pertinenti. In questo campo, infatti, Architettura, Storia all'arte, Geomatica, Ingegneria strutturale sono solo alcune dell'ampio spettro di discipline coinvolte, di cui ogni attore utilizza metodologie, informazioni di partenza e *software* specifici. È necessario, tuttavia, che ciascun prodotto specialistico interagisca, si misuri e rapporti con gli altri per ottenere un'unica interpretazione olistica. A tal fine risulta, dunque, fondamentale il concetto di interoperabilità per garantire un flusso informativo integro e completo.

Questa, tuttavia, è una problematica ancora irrisolta che alimenta, ormai da tempo, differenti studi e ricerche.

Nel capitolo in questione si descrivono, per l'appunto, i test eseguiti, nel contesto del progetto di ricerca Main10ance, al fine di permettere un'integrazione tra *software* BIM, GIS e DBMS. È opportuno, però, in primo luogo, introdurre i concetti fondamentali alla base del GIS non ancora esplicitati.

7.1 GIS

GIS, acronimo di *Geographic Information System*, sta per Sistema Informativo Geografico ossia “un sistema informativo basato su tecniche informatiche in grado di acquisire, memorizzare, aggiornare, modellizzare, manipolare, estrarre, analizzare e presentare in forma multimediale dati a referenza geografica (georeferenziati).”¹⁸

Sostanzialmente il GIS è per l'urbanistica ciò che il BIM è per le costruzioni; un insieme di procedure per la gestione di dati dettagliati e aggiornati sul territorio, inserito in un quadro organizzativo, idoneo ad analizzare e rappresentare fenomeni ed oggetti della realtà sulla superficie terrestre, attraverso un modello spaziale a scala territoriale.

Questi particolari sistemi informativi integrano le operazioni tipiche dei *database* con analisi geografiche, in altri termini correlano informazioni alfanumeriche con informazioni spaziali¹⁹ degli oggetti reali.

¹⁸ Prof. ANDREA LINGUA, *Cartografia numerica e GIS*, Politecnico di Torino 2018.

¹⁹ *Guida al BIM – La rivoluzione digitale dell'edilizia*, ACCA SOFTWARE, edizione 20-03-2019.

Nel dettaglio, con “informazioni alfanumeriche” si intendono informazioni che descrivono gli oggetti della realtà, mentre le “informazioni spaziali” si distinguono in “geometriche” e “topologiche”: le prime attinenti a forma, dimensione e posizione degli oggetti, le seconde riguardanti le reciproche relazioni spaziali tra i diversi elementi.

I GIS lavorano, localizzando gli oggetti, raggruppandoli in base a comuni attributi alfanumerici e gestendoli come diversi strati informativi (*layer*) georeferenziati [Figura 163]; gli elementi appartenenti a tali strati informativi, se riferiti allo stesso sistema di coordinate, possono essere comparati e analizzati generando, dunque, nuove informazioni.

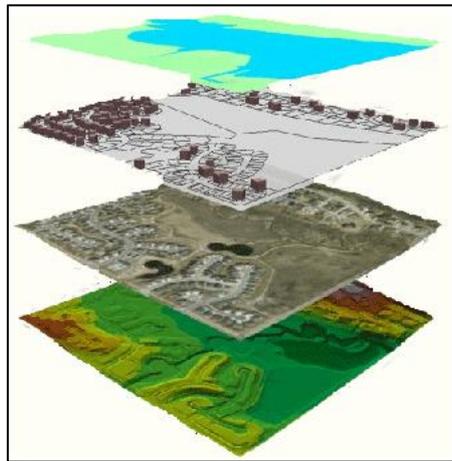


Figura 163 - Strati informativi alla base del GIS.

Fonte: <http://www.datrevo.com/gis-sistema-per-la-gestione-dei-dati-geografici/>

Questo modo di operare rende il GIS un potenziale utilizzabile in differenti campi per effettuare analisi sul territorio e programmare strategie decisionali.

7.1.1 Il software *ArcGIS*

Tra i più famosi *software* GIS rientra *ArcGIS*, sviluppato dalla casa produttrice ESRI, e composto da diversi ambienti operativi, uno di questi è *ArcGIS Desktop*.

ArcGIS Desktop è una *suite* completa di applicazioni professionali, quali *ArcCatalog*, *ArcMap*, *ArcScene*, *ArcToolbox*, *ArcGlobe* e *ModelBuilder*.

L'impiego congiunto di tali applicazioni, completate da una serie di estensioni, permette di effettuare qualsiasi genere di operazione GIS, dalle più banali a quelle più articolate; in particolare, è possibile produrre cartografia, gestire ed elaborare dati ed eseguire analisi geografiche.

Nella presente tesi, sono state adoperate le applicazioni *ArcCatalog* e *ArcScene* nella versione 10.7.1.

In generale, *ArcCatalog* è usata, principalmente, per trovare, organizzare e gestire dati geografici e informazioni quali mappe e globi, oltre a permettere la connessione con *database* esistenti.

ArcScene, inclusa nell'estensione *ArcGIS 3D Analyst*, consente, invece, la visualizzazione delle informazioni geografiche in tre dimensioni, la costruzione di scene 3D per mezzo di *layer* sovrapposti, la selezione e l'acquisizione di dati tabellari relativi a quest'ultimi.

7.2 Interoperabilità DBMS-HBIM e DBMS-GIS

L'approccio olistico necessario per valorizzare e tutelare il patrimonio culturale assume maggiore importanza considerando la rete dei Sacri Monti.

Soffermandosi ad analizzare il singolo caso del Sacro Monte di Varallo e, considerandone vastità e complessità, diventa necessaria un'attenta valutazione di temi che a partire dalle grandi scale del costruito spazino fino alla scala territoriale.

Ragion per cui, il Politecnico di Torino mette in campo per il progetto Main10ace, come illustrato nel primo capitolo, la piattaforma informativa multi-scala la cui chiave di volta è un unico e grande *database*, un vero e proprio "scrigno" di informazioni eterogenee, nato dall'integrazione di sistemi di archiviazione di dati a scale differenti, quali il BIM e il GIS. Per l'implementazione dello stesso *database*, strutturato secondo il modello logico in 6 Livelli di Dettaglio (LOD), si prevede di inserire [Figura 164], nei LOD 0 e LOD 1, tutti gli oggetti cartografici e in generale le entità relative alla scala territoriale, inclusa l'"Unità Volumetrica" ovvero il volume elementare riferito ad un edificio privo di copertura.

Le entità di questi primi LOD, insieme a parte di quelle programmate per il LOD 2, quali "ElevationGridCoverage - DSM", "Topografia" e "Aiuola", ancora attinenti alla scala territoriale e per la cui realizzazione si è fatto ricorso principalmente all'infrastruttura di dati BDTRE, costituiscono la macrocategoria "AMBIENTE ESTERNO".

La restante parte del LOD 2 racchiude le entità "ElementoCopertura" e "Building Part". Nel dettaglio l'oggetto "Building Part", derivante dall'infrastruttura di dati dello standard IFC e rappresentante la singola cappella che potrebbe essere contenuta

all'interno dell'oggetto "Unità Volumetrica", costituisce il nesso tra il LOD 2 e i successivi LOD 3 e LOD 4.

Quest'ultimi comprendono le entità appartenenti alle categorie BENI IMMOBILI e BENI MOBILI indicanti, rispettivamente, gli elementi edilizi in cui è possibile scomporre una singola cappella e gli apparati decorativi contenuti nella stessa.

Le suddette entità dei LOD 3, LOD 4 e parte del LOD 2 definiscono la macrocategoria "EDIFICIO" relativa alla scala di dettaglio architettonica.

Infine, il LOD 5 individua le entità riguardanti la manutenzione sui Sacri Monti, quelle prese in considerazione in questo lavoro sono state "RischioPerEdificio" e "GlossarioPerEdificio".

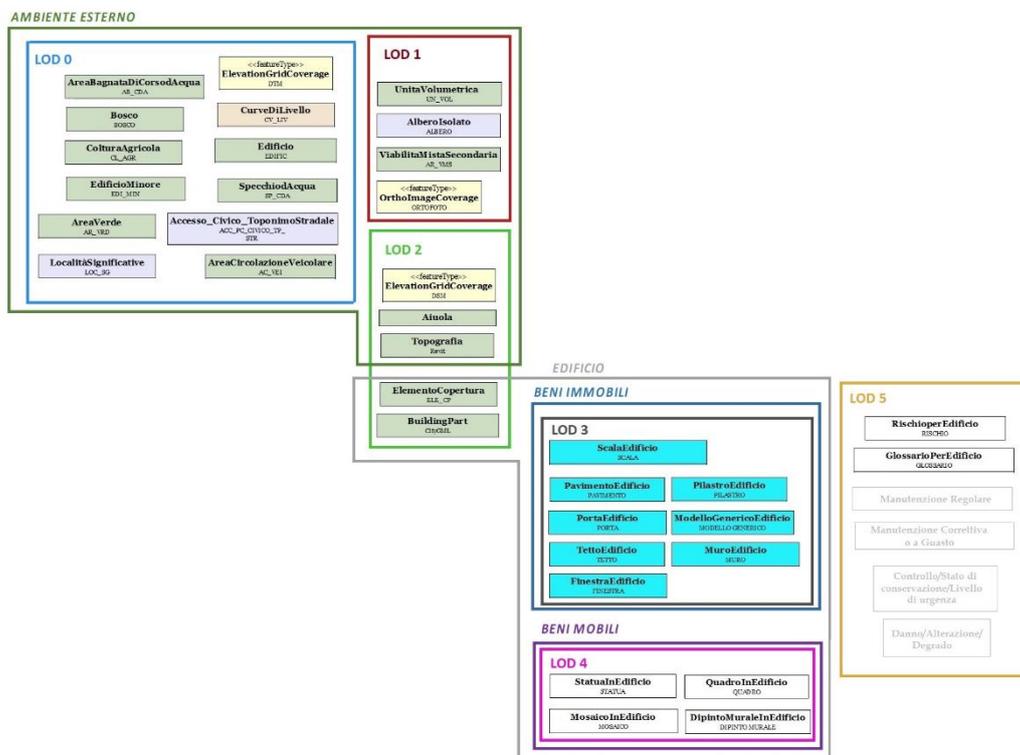


Figura 164 - Entità del modello logico da implementare all'interno del database.

La vera svolta non è, tuttavia, la sola possibilità di intreccio di dati a scala differenti in un unico database, quanto la capacità di interazione tra lo stesso e i 2 sistemi informativi tridimensionali (BIM e GIS), che permette l'arricchimento reciproco di informazioni e l'implementazione trasversale dei dati.

Questa opportunità, infatti, accresce da un lato le infrastrutture di dati GIS e BIM dettagliandole con informazioni relative anche a scale che non gli competono e dall'altro permette l'eventuale modifica di dati in tutti i software; In tal modo si

incrementa la collaborazione fra professionisti, a diversi *background*, coinvolti nella conservazione del patrimonio, ottenendo una maggiore qualità del risultato finale.

L'idea è quella di utilizzare come struttura iniziale del *database* di Main10ance quella del modello della Cappella 17, realizzato con il *software* BIM *Revit*, ed implementarla secondo lo schema del modello logico con nuove tabelle create direttamente nel DBMS. In questo modo, infatti, l'implementazione del *database*, per quel che riguarda i dati del BIM, è diretta, in quanto si esportano già le classi di entità con le relative istanze utilizzate nel modello BIM (ad es. tipi di muri, finestre, ecc). A tal fine, quindi, è necessario generare un collegamento con un DBMS che deve consentire anche la visualizzazione nel *software* *Revit* dell'*editing* dei dati, attinenti alle istanze, effettuata nel DBMS. Per creare la suddetta connessione si è reso necessario l'utilizzo del *plugin* *Autodesk Revit DB Link*.

Con la presente tesi sono stati effettuati proprio i primi test sperimentali per valutare la fattibilità dell'interoperabilità tra DBMS e sistemi informativi BIM e GIS. Nel grafico, riportato di seguito, si illustrano i test effettuati tra i diversi *software* [Figura 165].

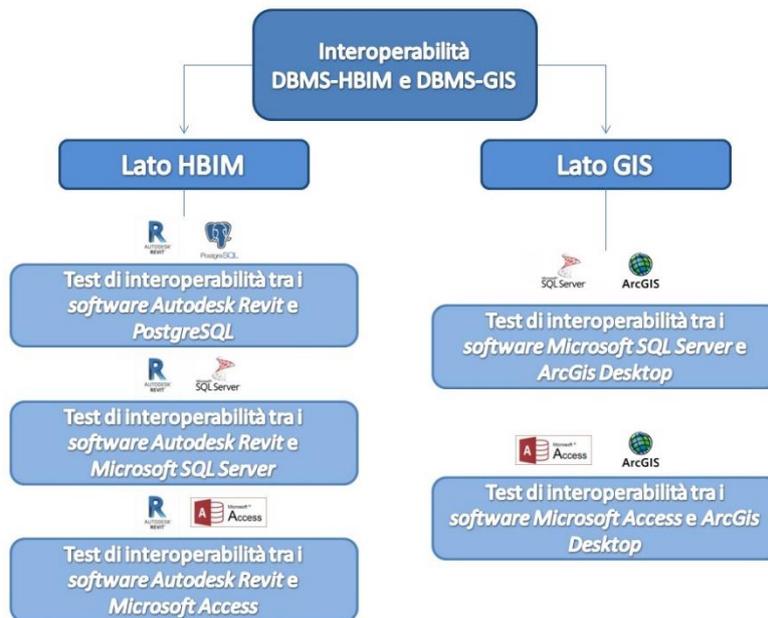


Figura 165 - Schema grafico dei test di interoperabilità effettuati tra i diversi software.

7.2.1 Test di interoperabilità tra i *software* *Revit* e *PostgreSQL*

Con il primo test si è valutata la connessione tra il *software* BIM *Revit* e *PostgreSQL*, DBMS relazionale a oggetti, *open source*, che utilizza il linguaggio SQL, ed è disponibile gratuitamente sul WEB.

La scelta iniziale di *PostgreSQL* era giustificata dalla presenza di una sua estensione spaziale *PostGIS* che avrebbe permesso di aggiungere dati di tipo spaziale a quelli alfanumerici di un classico *database*, permettendo, dunque, la creazione di un geodatabase.

Avviata, quindi, l'installazione del *software*, è stato richiesto l'inserimento di una *password* per il *superuser* di *PostgreSQL* ovvero l'utente con particolari privilegi di amministrazione sul *database* successivamente generato. Ulteriore motivo di scelta di *PostgreSQL*, infatti, era dovuto al suo utilizzo di un'architettura *client-server*, ovvero, il *database*, gestito su un *server* centralizzato, è accessibile a più utenti. Contemporaneamente è stato effettuato il *download* di *PgAdmin 4*, *client* grafico di *PostgreSQL* che ha consentito la gestione del DBMS in modo semplificato anche durante il test.

Sin dal principio, nella prova effettuata, operando con le medesime procedure riportate di seguito, non vi è stato esito positivo dall'esportazione dell'archivio dati del modello della Cappella 17 tramite il *plug-in Revit DB Link*. Pensando, tuttavia, che a collegamento avvenuto fosse stata possibile la successiva importazione in *Revit* del *database* implementato, si è proceduto a generare il nuovo *database* "Main10ance" nell'interfaccia *PgAdmin* [Figura 166] e, in seguito, a creare il collegamento tramite il comando *Esporta* → *Database ODBC*.

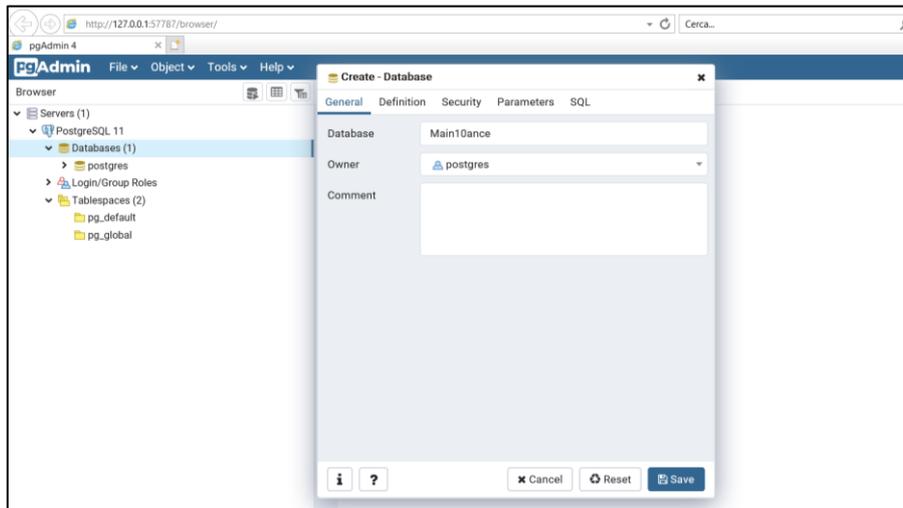


Figura 166 - Creazione *database* "Main10ance" in *PostgreSQL*.

Selezionato, dunque, nel menù *Origine dati su file* il tasto *Nuovo* fino a scegliere il driver *PostgreSQL ODBC Driver (ANSI)* [Figura 167], e salvata la nuova origine dati [Figura 168], è stata generata la connessione compilando i campi all'interno della

finestra *PostgreSQL Connection* e avendo cura di impostare lo stesso nome del *database* precedentemente creato [Figura 169].

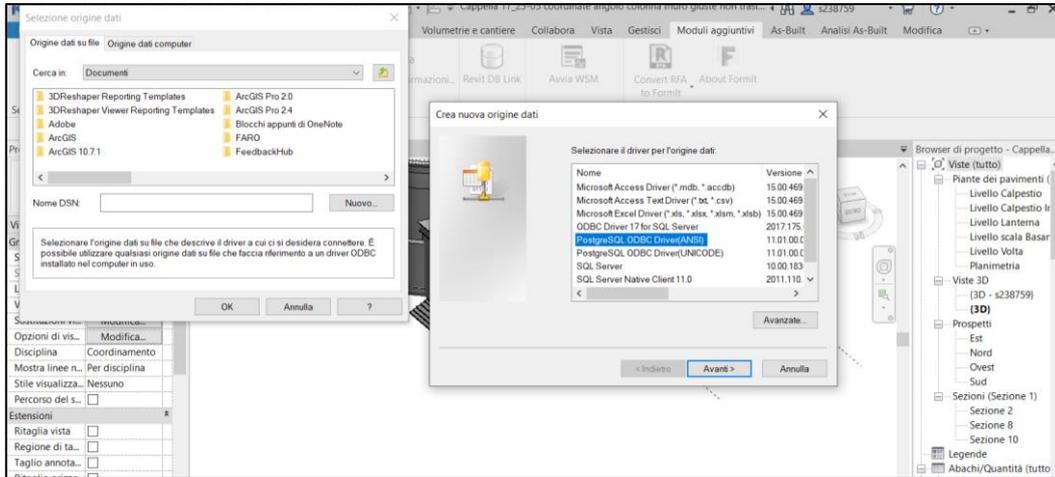


Figura 167 - Creazione nuova origine dati per *PostgreSQL*.

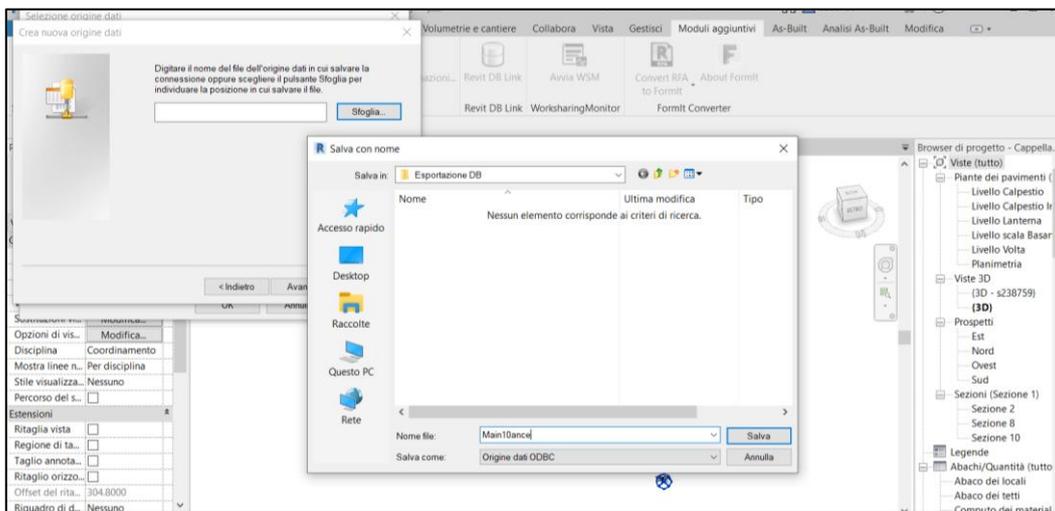


Figura 168 - Salvataggio nuova origine dati per *PostgreSQL*.

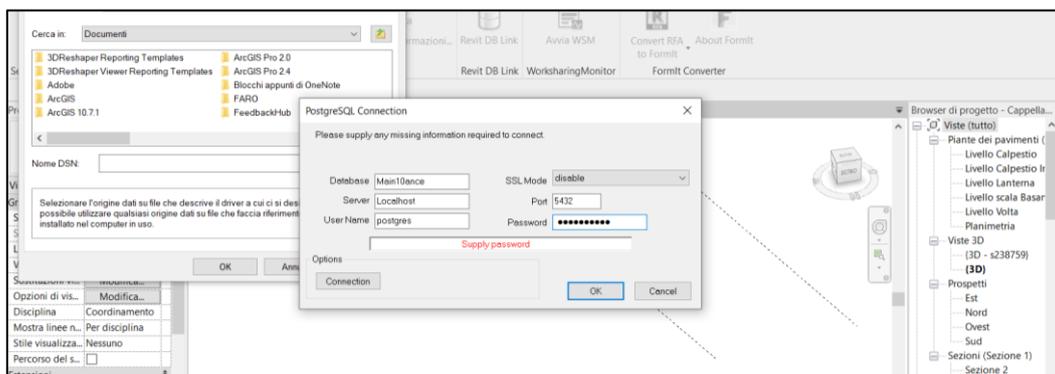


Figura 169 - Compilazione campi della finestra *PostgreSQL Connection*.

In *PgAdmin* è stato eseguito l'aggiornamento del *database* "Main10ance"; si è potuto, quindi, visualizzare le tabelle esportate e constatarne la possibilità di eventuale modifica [Figura 170].

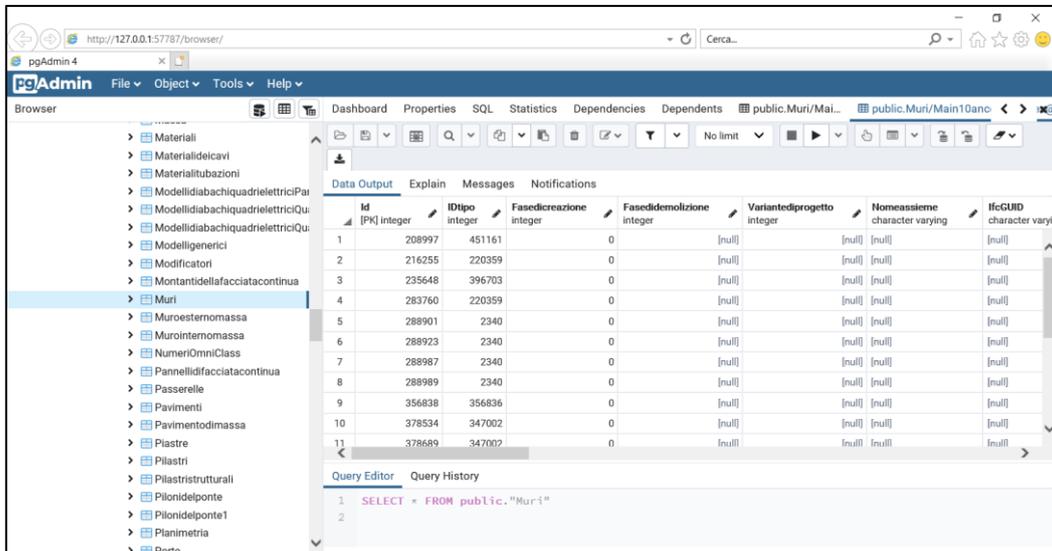


Figura 170 - Visualizzazione in *PostgreSQL* del *database* "Main10ance" esportato.

Al momento dell'importazione del *database* nel *software* di modellazione si è, però, preso atto dell'insuccesso di *Revit DB Link* anche in questa direzione e si è pertanto scartato l'utilizzo del *software PostgreSQL*.

Struttura del *database* generato in ambiente BIM e creazione dei parametri condivisi

L'esportazione del *database* all'interno del *software PostgreSQL*, tuttavia, ha delucidato su come il sistema informativo BIM organizzasse le tabelle e i relativi campi, permettendo il confronto con la struttura del modello logico.

Questa comparazione ha consentito una preventiva individuazione delle tabelle esportabili e dei campi mancanti nelle stesse.

In particolare, si è constatato che dalla struttura del *database* generato dal sistema informativo BIM, fosse possibile ottenere la tabella relativa all'"Unità Volumetrica" e gran parte di quelle appartenenti alla macrocategoria "EDIFICIO", per cui si è previsto di realizzare le restanti all'interno del DBMS come evidenziato nella figura a seguire. [Figura 171]

Inoltre, si è proceduto, in ambiente *Revit*, all'implementazione dei campi mancanti nelle tabelle esportate per mezzo dei parametri condivisi; quest'ultimi sono parametri salvati in un *file .txt* esterno da qualsiasi *file* di *Revit* e, dunque, utilizzabili in più famiglie e progetti.

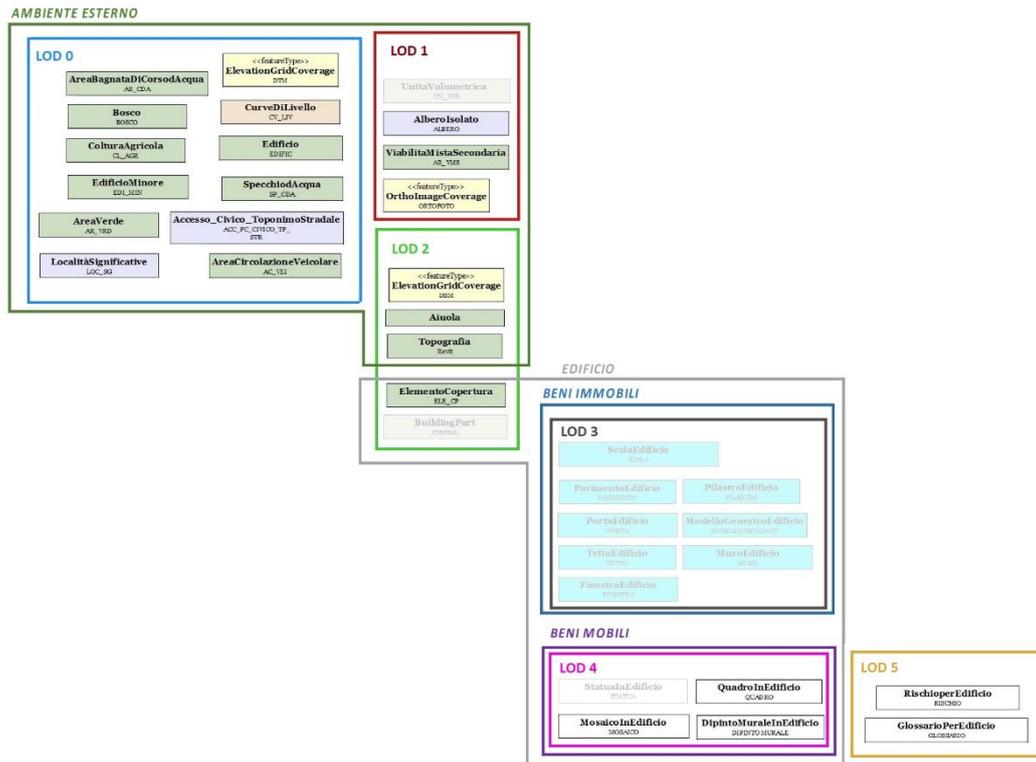


Figura 171 - Tabelle la cui realizzazione è prevista all'interno del DBMS.

La loro realizzazione è avvenuta per mezzo del comando *Parametri condivisi*, presente nel pannello *Gestisci* di *Revit*, specificando la cartella di salvataggio del file .txt e nominando il gruppo di parametri come “SMV”.

In dettaglio sono stati creati inizialmente i seguenti parametri [Figura 172]:

- **Id_bup**: rappresenta l’identificativo dell’entità “Building Part”;
- **DATA_AGG**: indica la data di aggiornamento del dato;
- **Materiale**: identifica il materiale di rivestimento dell’elemento a cui è associato;
- **Volumearmaturastimato**: specifica il volume di armatura stimato per il relativo elemento;
- **Area**: fornisce la dimensione superficiale dell’elemento in m².

Per visionare i parametri tra le proprietà degli oggetti d’interesse del modello, sono stati assegnati alle corrispondenti categorie, utilizzando i *Parametri di Progetto* presenti nel pannello *Gestisci* [Figura 173].

Esattamente, le categorie considerate nell’associazione dei parametri sono: “Scale”, “Muri”, “Pavimenti”, “Porte”, “Finestre”, “Tetti”, “Pilastr” e “Modelli generici”.

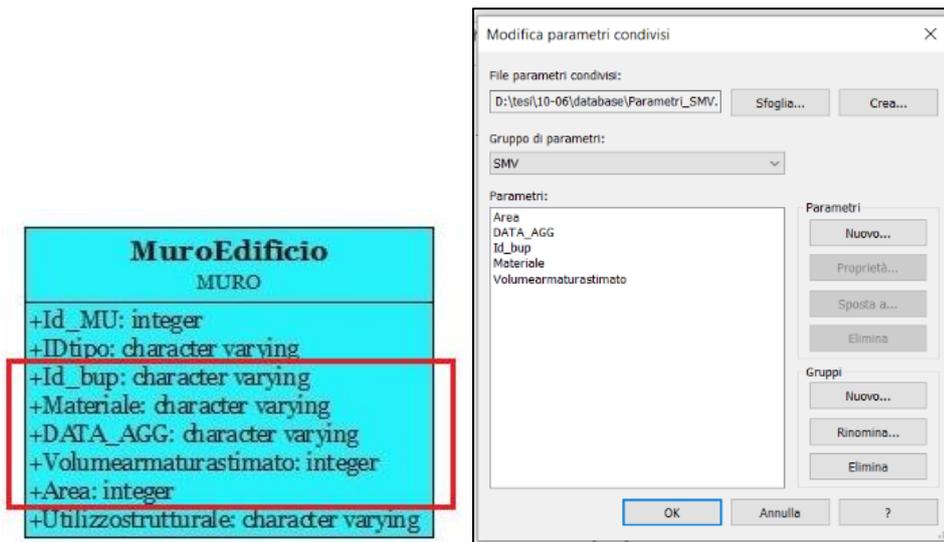


Figura 172 - Creazione parametri condivisi come da tabella del modello logico.

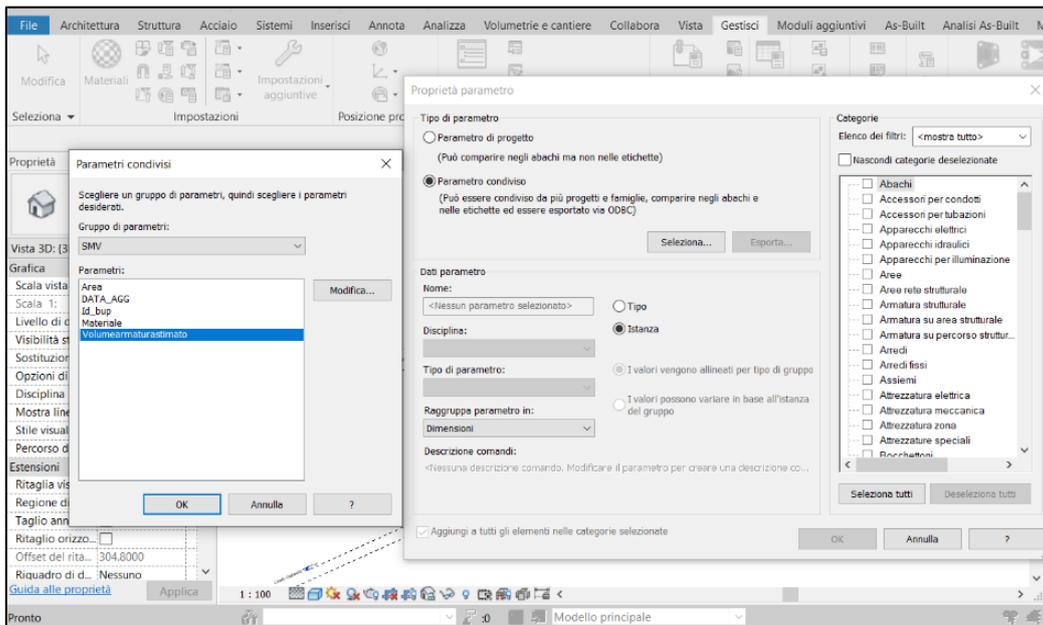


Figura 173 - Finestra di impostazione parametri di progetto.

7.2.2 Test di interoperabilità tra i software Revit e Microsoft SQL Server

Per la prova è stato creato, in *Microsoft SQL Server*, il nuovo database “Main10ance1”, dopo l’avvenuta connessione del server in locale [Figura 174]. Proseguendo, in ambiente *Revit*, si è effettuato il collegamento ODBC tramite *Revit DB Link* con una nuova origine dati su file per un driver *SQL server* [Figura 175].

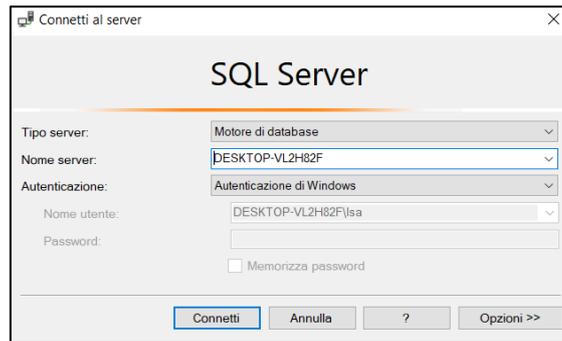


Figura 174 - Connessione del *Server* in locale.

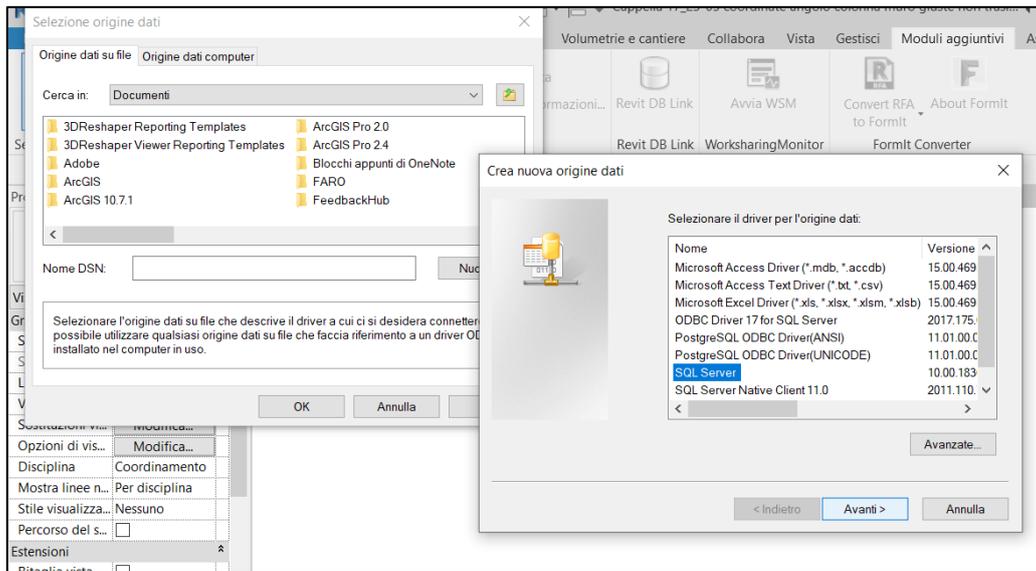


Figura 175 - Creazione nuova origine dati per *SQL Server*.

La successiva finestra di impostazioni avanzate è stata compilata inserendo i nomi dei relativi *Server* e *Database* [Figura 176].

Salvando, dunque, l'origine dati è stata creata la connessione [Figura 177].

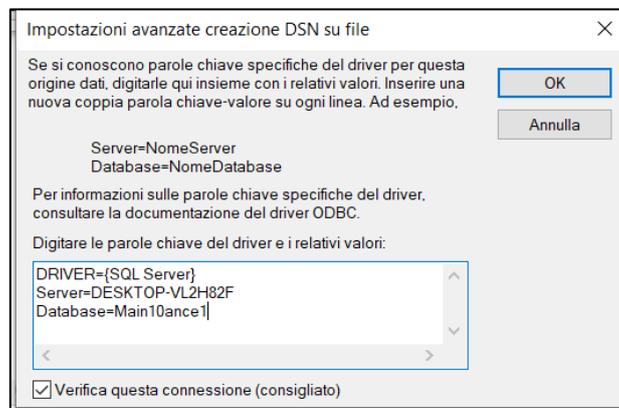


Figura 176 - Compilazione della finestra di impostazioni avanzate.

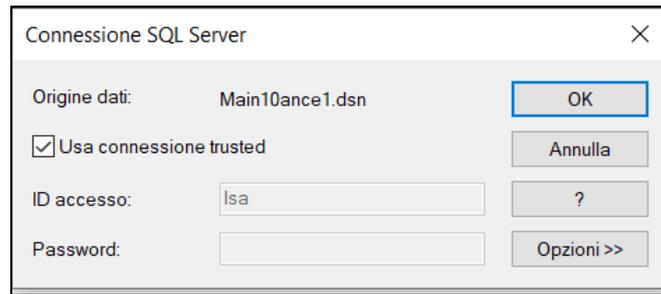


Figura 177 - Creazione della connessione con *SQL Server*.

Si è appurata l'effettiva presenza, in *SQL Server*, del *database* esportato e dei campi aggiunti con i parametri condivisi. A questo punto, sono stati implementati i dati importati [Figura 178] e, reimportato il *database* in ambiente *Revit* mediante *Revit DB Link* e selezionando la stessa connessione, se ne è verificata la visualizzazione [Figura 179].

Analogo metodo è stato utilizzato anche per verificare che le modifiche apportate ai dati, nel sistema informativo tridimensionale, fossero riscontrabili nel DBMS [Figura 180 e Figura 181].

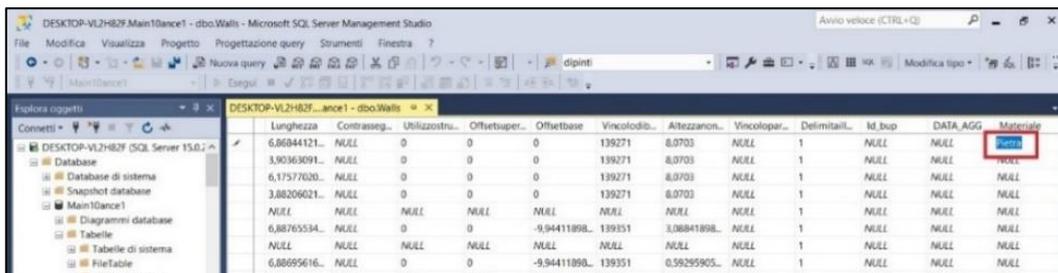


Figura 178 - Test di compilazione dati in ambiente *SQL Server*.

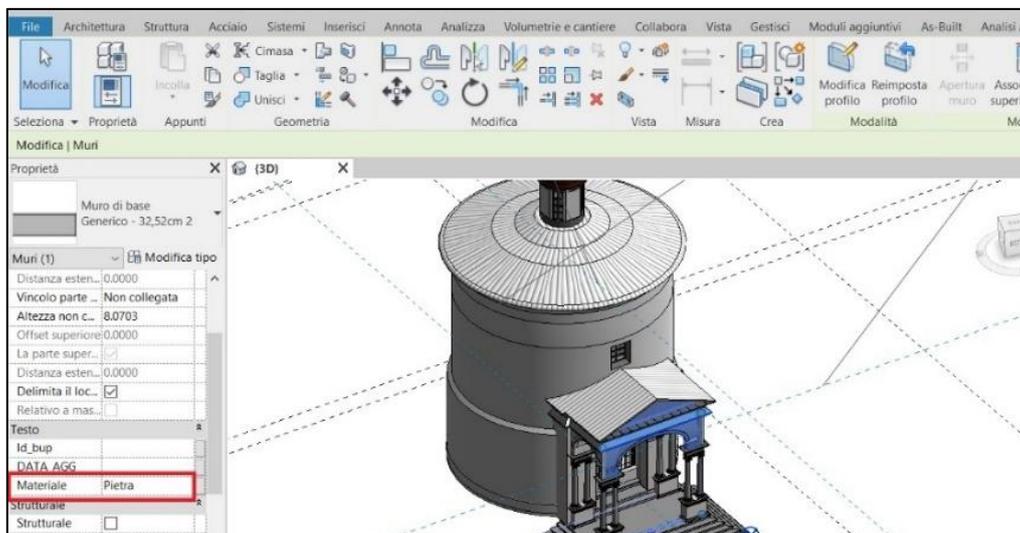


Figura 179 - Verifica, in ambiente *Revit*, della visualizzazione dei dati compilati in *SQL Server*.

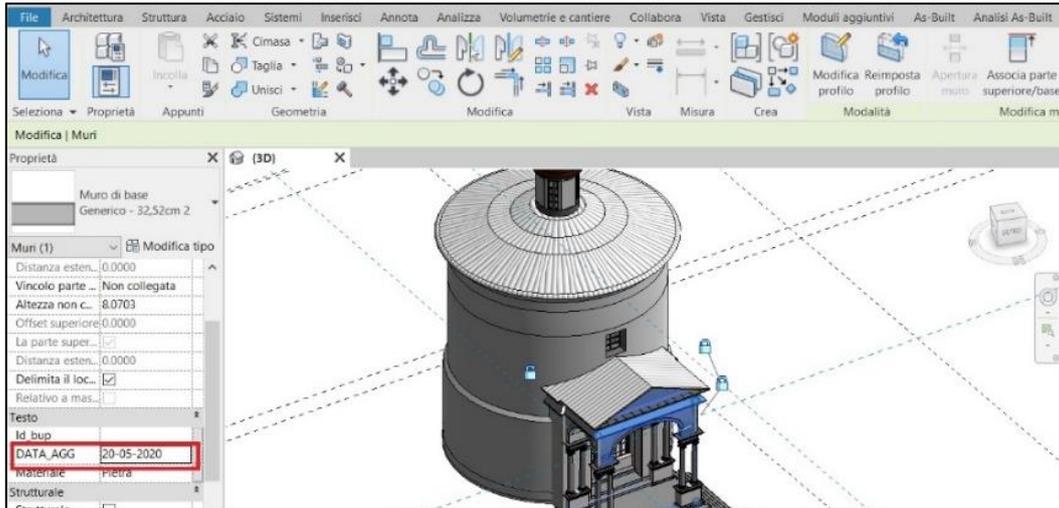


Figura 180 - Test di compilazione dati in ambiente Revit.

Connetti	Lunghezza	Contrasseg...	Utilizzostru...	Offsetsuper...	Offsetbase	Vincolodib...	Altezzanon...	Vincoloper...	Deimitail...	Id_bup	DATA_AGG	Materiale
dbo.StructuralStiffeners	6,86844121...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	20-05-2020	Pietra
dbo.StructuralStiffenersTyp	3,90363091...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.StructuralTrusses	6,17577020...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.StructuralTrussTypes	3,88206021...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.SwitchSystem	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.TelephoneDevices	6,88765534...	NULL	0	0	-9,94411898...	139351	3,08841898...	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.TelephoneDeviceTyp	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.Topography	6,88695616...	NULL	0	0	-9,94411898...	139351	0,59295905...	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.TopographyTypes	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.Views	0,93460757...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
dbo.VoltageTypes	0,93458170...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
dbo.Walls	0,93453792...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Colonne	0,93458462...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Chiodi	0,93458447...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Vincoli	0,93458406...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Trigger	0,93463095...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Indici	0,93456260...	NULL	0	0	0,45209999...	358359	2,33728405...	370735	1	NULL	NULL	NULL
Statistiche	0,72499999...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.WallSweeps	0,72500000...	NULL	0	0	0	139271	8,0703	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.WallSweepTypes	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.WallTypes	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.WallUsageEnums	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.Windows	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL
dbo.WindowTypes	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	1	NULL	NULL	NULL

Figura 181 - Verifica, in ambiente SQL Server, della visualizzazione dei dati compilati in Revit.

7.2.3 Test di interoperabilità tra i software Revit e Microsoft Access

Nella prova effettuata tra Revit e Microsoft Access, affinché la connessione con Revit DB Link funzionasse, è stata necessaria la preventiva installazione del pacchetto Access Runtime, non installato per default con il pacchetto Office.²⁰

Dopo aver, dunque, creato un nuovo database “Main10ance20” su Access ed averlo salvato in versione 2002-2003, unica funzionante con Revit DB Link, tramite quest’ultimo e semplicemente selezionando il modulo MS Access 2007-2016, è stata creata una nuova connessione, individuando il file precedentemente salvato.

²⁰ <https://knowledge.autodesk.com/it/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ITA/Revit-AddIns/files/GUID-BBA71A6A-8D7A-4050-A279-9783AE6E918F-htm.html>

Come nel test precedente è stato possibile verificare l'opportunità di modifica e visualizzazione trasversale in entrambi i *software*, tramite il *plug-in Revit DB Link* e selezionando la connessione esistente [Figura 182, Figura 183, Figura 184 e Figura 185].

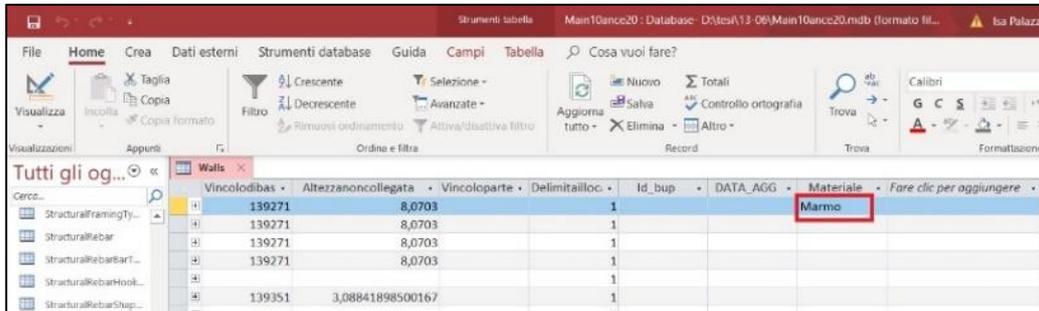


Figura 182 - Test di compilazione dati in ambiente *Microsoft Access*.

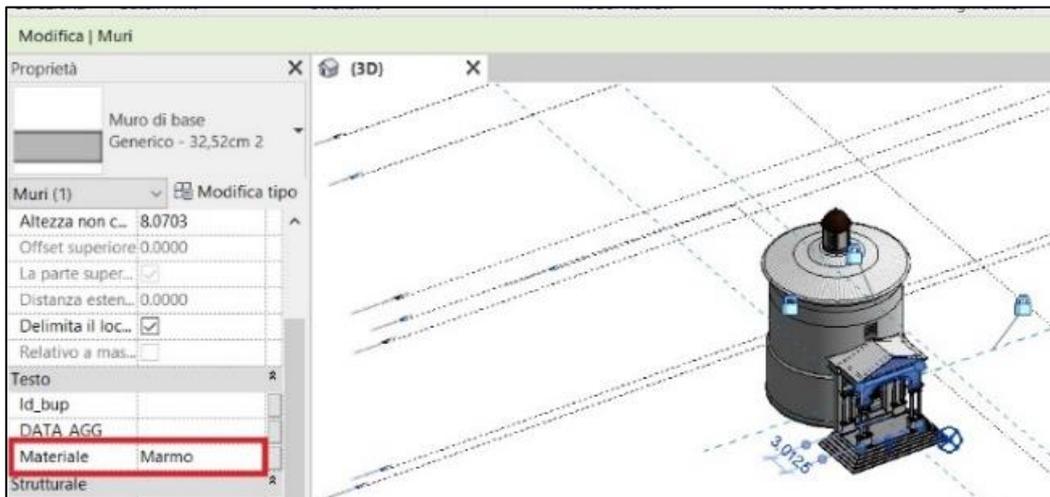


Figura 183- Verifica, in ambiente *Revit*, della visualizzazione dei dati compilati in *Microsoft Access*.

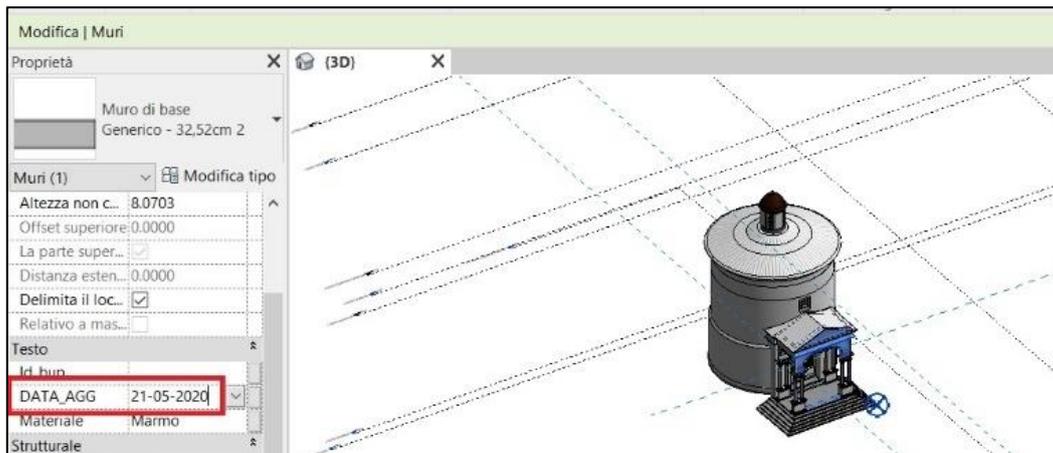


Figura 184 - Test di compilazione dati in ambiente *Revit*.

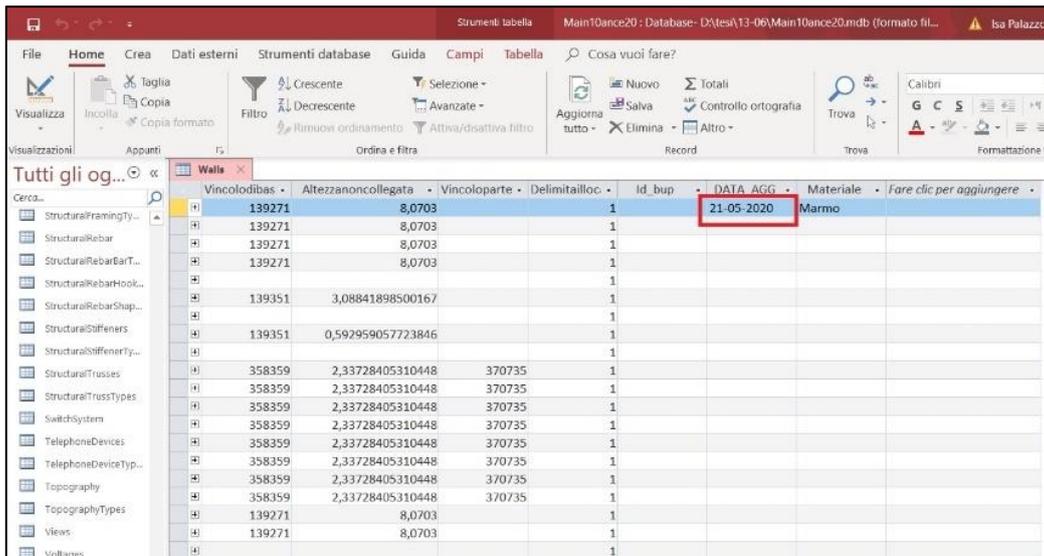


Figura 185 - Verifica, in ambiente *Microsoft Access*, della visualizzazione dei dati compilati in *Revit*.

7.2.4 Test di interoperabilità tra i software *Microsoft SQL Server* e *ArcGIS Desktop*

Per il test di interoperabilità tra *Microsoft SQL Server* e *ArcGIS Desktop*, si è proceduto all'apertura di *ArcScene* e, selezionata l'icona relativa ad *ArcCatalog*, si è scelto *Database Connection* → *Add Database Connection*; sono state settate le impostazioni della maschera di connessione come da [Figura 186].

La nuova connessione appare, quindi, su *ArcCatalog* con estensione *.sde* ed è possibile rinominarla [Figura 187].

Attraverso il comando *Add Data* e selezionando la connessione stabilita è stata possibile la sola visualizzazione del *database* all'interno di *ArcScene*, in quanto l'*editing* non è supportata per il formato *.sde* [Figura 188].

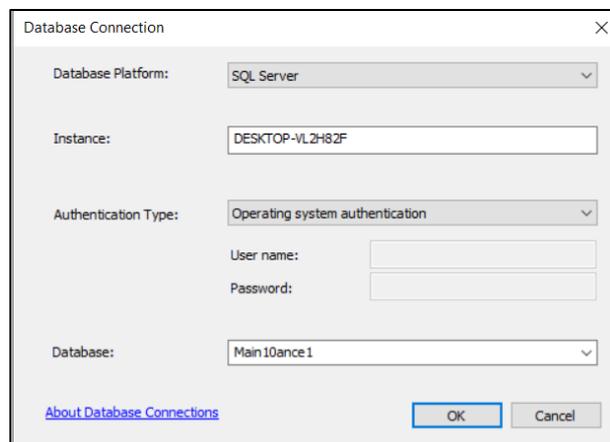


Figura 186 - Impostazioni maschera di connessione in ambiente *ArcScene*.

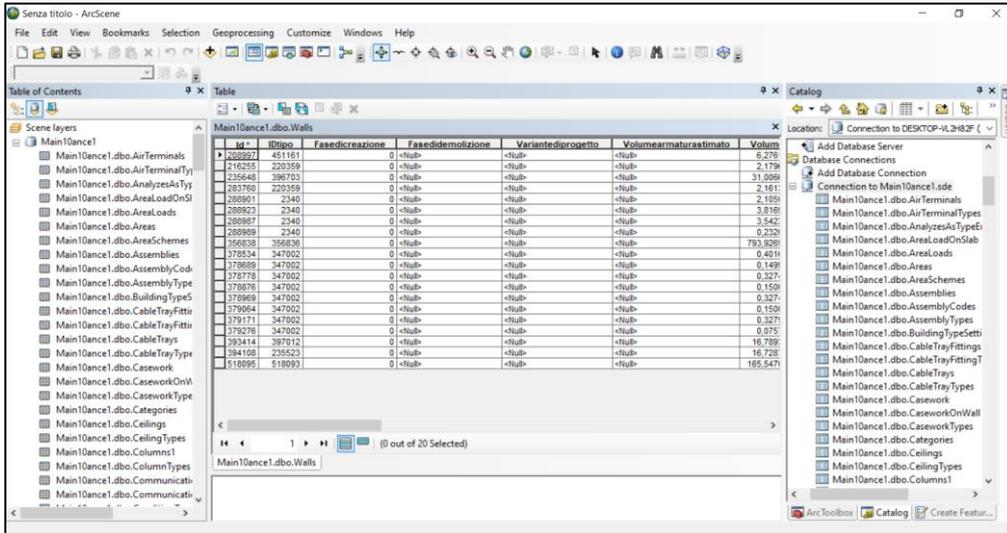


Figura 187 - Connessione al database "Main10ance1" e visualizzazione dello stesso in ArcScene.

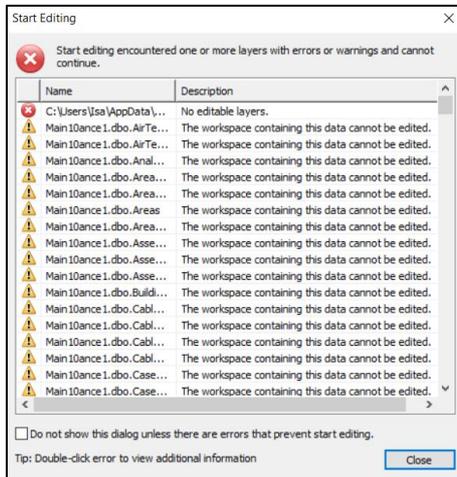


Figura 188 - Messaggio di errore all'avvio dell'editing.

L'unica possibilità è stata l'esportazione delle tabelle, cliccando su ciascuna con tasto destro e scegliendo *Data* → *Export*, e il salvataggio come *file* .dbf con conseguente aggiunta al *Table of contents* [Figura 189].

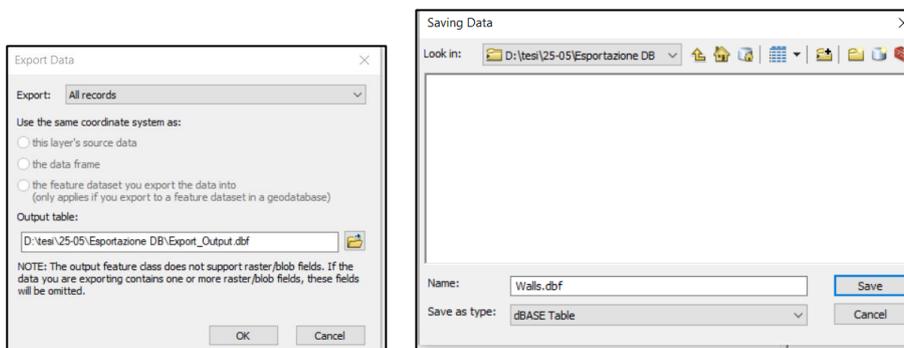


Figura 189 - Esportazione della tabella "Walls" in formato .dbf.

In questo modo le nuove tabelle create avranno un campo *OID* in più rispetto alle precedenti [Figura 190].

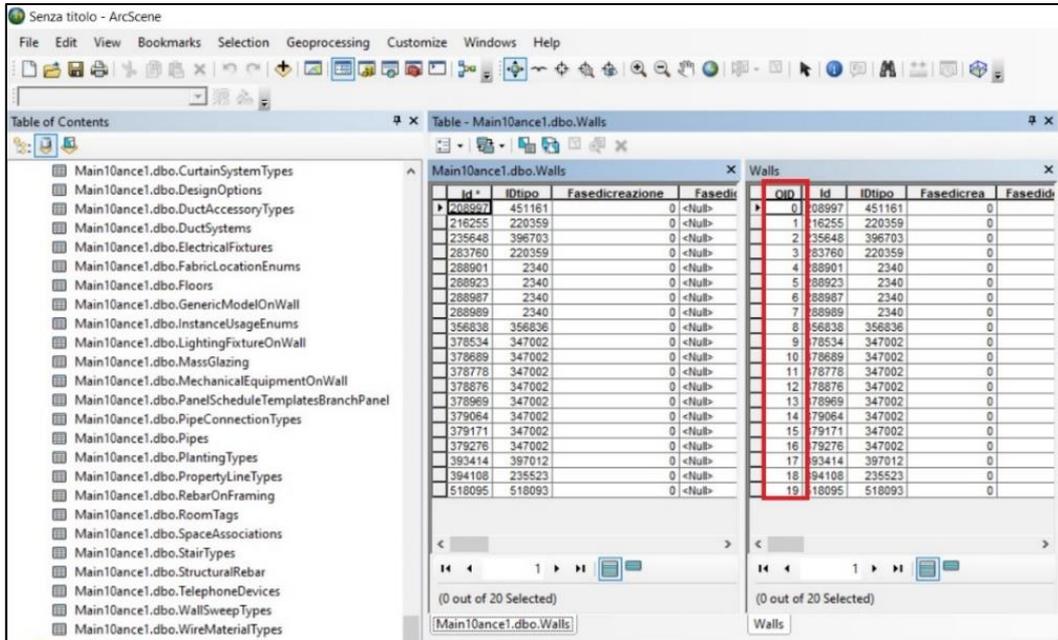


Figura 190 - Presenza del campo "OID" nelle tabelle in formato .dbf.

È possibile, quindi, editarle e importarle come *Table* all'interno della connessione, attraverso i tool *Table to Table* o *Table to Geodatabase*. Infine, in ambiente *SQL Server*, aggiornando il *database* "Main10ance1", è possibile visualizzare le tabelle, precedentemente importate nella connessione, con le relative implementazioni [Figura 191].

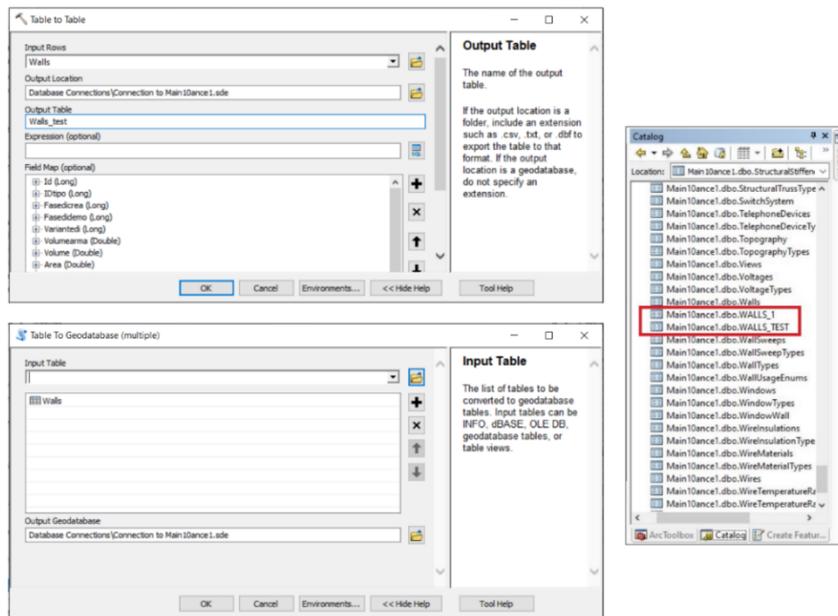


Figura 191 - Importazione delle tabelle in formato .dbf all'interno della connessione attraverso i tool *Table to Table* e *Table to Geodatabase*.

Tuttavia, tali entità, pur avendo gli stessi campi delle tabelle di origine, risultano come nuove aggiunte al *database*, pertanto non sono visualizzabili in *Revit*, in quanto quest'ultimo mostra le sole implementazioni apportate alle tabelle associate a ciascun oggetto modellato.

7.2.5 Test di interoperabilità tra i software *Microsoft Access* e *ArcGIS Desktop*

Per quel che riguarda *Microsoft Access* e *ArcGIS Desktop* è stato effettuato un collegamento tramite OLE DB. Al tal fine è stato necessario inserire, nella barra degli strumenti di *ArcCatalog*, il pulsante *Add OLE DB Connection* attraverso il menù *Customize* → *Customize Mode*, scegliendo nella finestra di dialogo la scheda *Commands* e la categoria *ArcCatalog* [Figura 192].

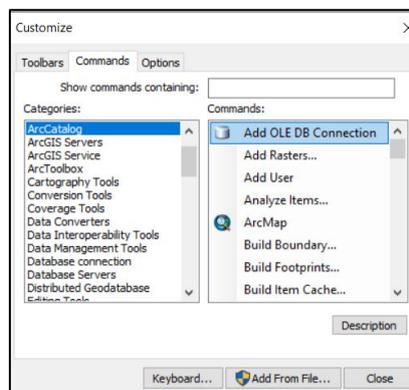


Figura 192 - Aggiunta del comando *Add OLE DB Connection*.

Successivamente, con il comando aggiunto e selezionando il *Provider OLE DB* come da immagine [Figura 193], si è proceduto a individuare nella scheda *Connessione* il *database* di *Microsoft Access* “Main10ance20”.

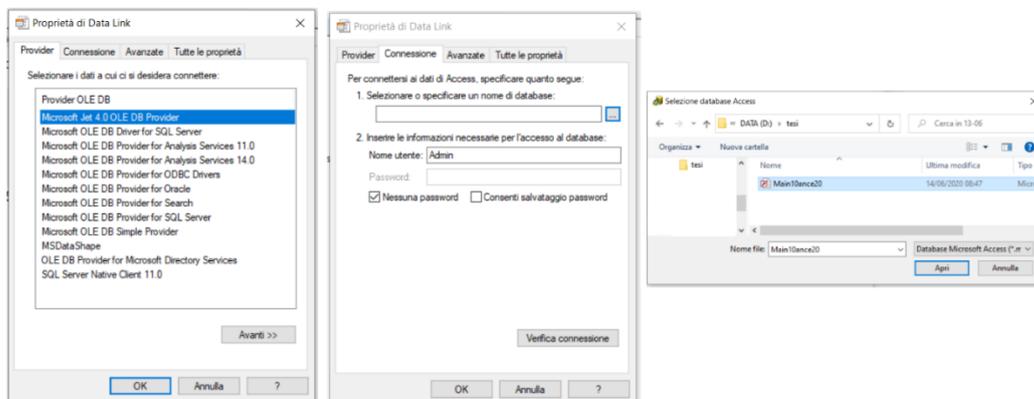


Figura 193 - Procedura di connessione OLE DB al *database* "Main10ance20".

Dopo l'aggiornamento del *Database Connections* nel *Catalog Tree*, si è visualizzata l'avvenuta connessione al *database* con estensione *.odc*.

A questo punto, in ambiente *ArcScene*, sono state aggiunte, tramite *Add Data*, le relative tabelle al *Table of Contents* [Figura 194].

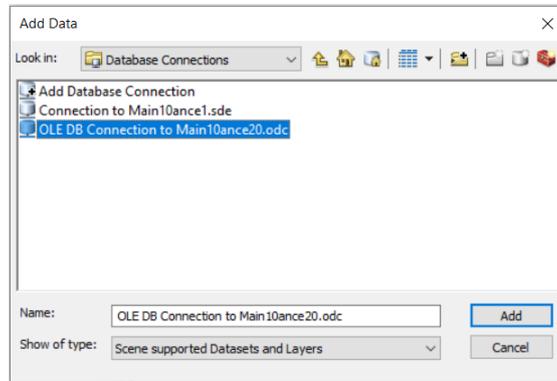


Figura 194 - Finestra *Add Data* in *ArcScene*.

Anche in questa prova è possibile la sola visualizzazione delle tabelle [Figura 195]; per la modifica l'unica soluzione è stata quella già illustrata nel test precedente, ma in tal caso senza alcun riscontro nel *database* di *Access*, in quanto non è consentita l'importazione delle tabelle editate all'interno della connessione.

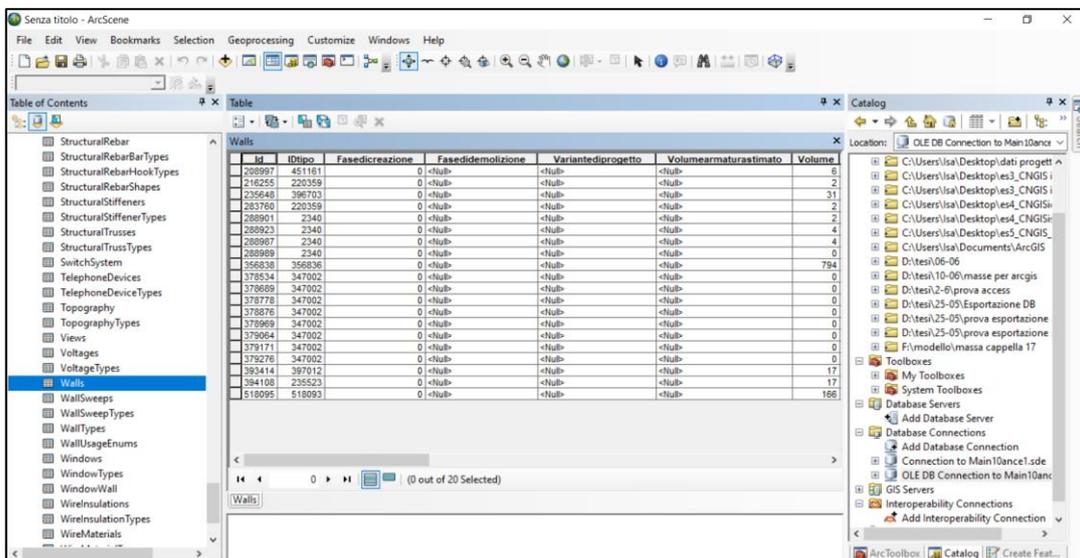


Figura 195 - Visualizzazione delle tabelle del *database* "Main10ance20" in *ArcScene*.

7.3 Implementazione del *database* di Main10ance

Valutati i diversi sistemi di connessione tra i *software* testati e i risultati ottenuti, per l'implementazione del *database* di Main10ance, la scelta è ricaduta sull'utilizzo del *software Microsoft Access*.

Nonostante, infatti, non consenta l'*editing* in *ArcGIS*, questo DBMS permette, comunque, una semplice gestione dei dati tra i *software* BIM e GIS ed, inoltre, risulta, in prima istanza, più intuitivo rispetto a *Microsoft SQL Server*.

Da un più attento confronto tra le tabelle esportate nel *database* "Main10ance20" e quelle presenti nello schema del modello logico, sono emerse, tuttavia, alcune problematiche.

Dal momento che il modello dettagliato della Cappella 17 e quello della relativa unità volumetrica dell'edificio erano stati generati in due progetti differenti, l'esportazione dei dati, sfruttando la stessa connessione, comportava la perdita delle informazioni relative a uno dei due *file*.

Pertanto si è optato per la rimodellazione dell'unità volumetrica, categorizzata come *Massa*, all'interno del *file* della Cappella 17 in modo che, a esportazione avvenuta, tutti i dati del BIM fossero in un unico *database* [Figura 196].

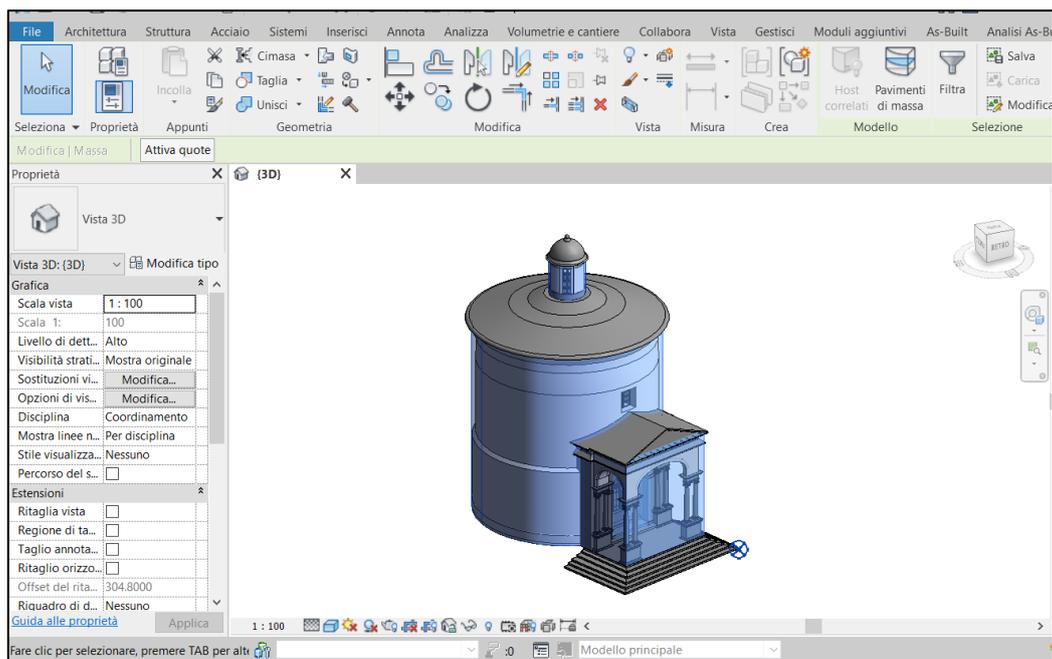


Figura 196 - Rimodellazione dell'unità volumetrica all'interno del progetto dettagliato della Cappella 17.

Così facendo, però, poiché, nel *file* della Cappella 17, alla categoria *Massa* erano stati associati anche dei "cubetti" rappresentativi delle statue, la stessa tabella, nel DBMS, conteneva sia le istanze relative all'unità volumetrica sia quelle attinenti alle sculture [Figura 197].

ID	IDTipo	Fasedicreazi	Fasedidemol	Variantedipr	Volumecomplessivo	Areacomplessivasup	Areacomplet	Commenti	Livellodibase
452602	Statua 1	Stato di Progett			0,593331640254472	4,90661107912034			
452765	Statua 2	Stato di Progett			0,146870749440883	1,81306822555607			
453601	Statua 3	Stato di Progett			0,57070601875448	4,34705970842069			
453824	Statua 4	Stato di Progett			0,732996749717947	5,35244216744062			
453966	Statua 5	Stato di Progett			0,679898165175832	5,18500123319602			
454277	Statua 6	Stato di Progett			0,652389510873879	5,00876285045752			
454897	Statua 7	Stato di Progett			0,410770222695123	3,70982420432642			
455175	Statua 8	Stato di Progett			0,310121508180907	3,04066633690842			
455381	Statua 9	Stato di Progett			0,380780874803421	3,6029792156159			
455590	Statua 10	Stato di Progett			0,675726580541789	5,23429333792757			
455993	Statua 11	Stato di Progett			0,659048230672645	5,09388979244132			
456175	Statua 12	Stato di Progett			1,23320271529324	7,14589578378541			
456427	Statua 13	Stato di Progett			0,788343990531577	5,76616422411702			
526922	Statua 14	Stato di Progett			0,694492464690882	4,96615545915683			
527192	Statua 15	Stato di Progett			1,50108748269272	7,98925328978124			
527564	Statua 16	Stato di Progett			1,05932583411533	7,27859411558415			
529850	Statua 17	Stato di Progett			1,41962668171195	8,39081093949741			
530006	Statua 18	Stato di Progett			1,54659360186031	8,3171457906474			
530214	Statua 19	Stato di Progett			0,604101732555825	4,5944174782812			
736138	Unità Volumetrica 1	Stato di Progett			2162,06661622266	926,525972701448			
737147	Unità Volumetrica 2	Stato di Progett			269,324264056256	260,612791518127			

Figura 197 - Presenza nella tabella "Mass" delle istanze relative alle Statue e all'unità volumetrica.

Per ovviare a tale problematica, si è scelto di mantenere la tabella “Mass” popolata dalle sole istanze dell’unità volumetrica e di crearne una nuova per le statue. È da precisare che la soluzione, tuttavia, non ha più consentito la modifica trasversale degli attributi relativi alle sculture.

In aggiunta, nello schema del modello logico sono presenti le entità “Unità Volumetrica” e “Building Part”, rispettivamente definite come:

- “Unità Volumetrica”: volume elementare dell’edificio privo di coperture;
- “Building Part”: singola cappella contenuta all’interno dell’unità volumetrica.

Tale distinzione è stata necessaria in quanto nel complesso del Sacro Monte di Varallo sono presenti anche edifici al cui interno sono contenute più cappelle.

Nel caso dell’edificio in esame, contenente la sola Cappella 17, la geometria dell’entità “Unità Volumetrica” coincide con quella del “Building Part”. Pertanto non essendo presenti, in *Revit*, due geometrie a cui attribuire diversi gruppi di parametri condivisi, si è deciso di considerare la sola entità “Unità Volumetrica”. Questa scelta non è ovviamente risolutiva se si considera l’eterogeneità degli edifici presenti al Sacro Monte di Varallo, ma ad oggi non è stata trovata ancora una soluzione accettabile nell’ambito della ricerca.

Si è inoltre appurato che modificando, all’interno di *Access*, i nomi delle tabelle, come da modello logico, le stesse non erano più riconosciute in ambiente *Revit* e quindi le successive esportazione da quest’ultimo comportavano la generazione di nuove tabelle. In questo caso si è optato per il mantenimento dei nomi originali delle tabelle esportate.

Anche la cancellazione di tabelle e di attributi, non utili all'implementazione del *database*, nonché modifiche del tipo di dati o della chiave primaria di entità esportate da *Revit* comportava una mancata accettazione del *database* al momento dell'importazione tramite il *plug-in Revit DB Link*. Di conseguenza, si è scelto di mantenere integre tutte le tabelle esportate, con la sola aggiunta, in ambiente *Revit*, degli attributi utili e, in *Microsoft Access*, delle rimanenti tabelle.

Dopo queste considerazioni, quindi, per l'effettiva implementazione del *database* è stato necessario, in *Revit*, eliminare alcuni parametri condivisi già realizzati, quale "Id_bup" e realizzarne nuovi come riportato nell'immagine seguente [Figura 198].

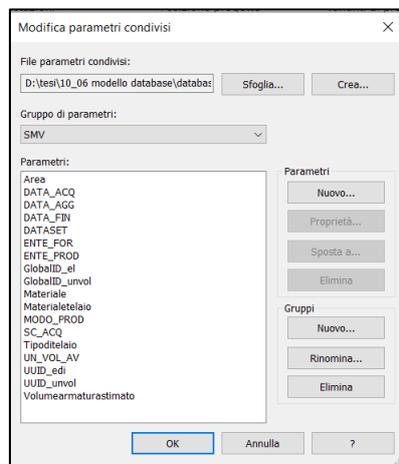


Figura 198 - Modifica e realizzazione dei parametri condivisi.

Con il successivo aggiornamento del *database*, in ambiente *Access*, ne è stata completata la struttura, creando nuove tabelle, attraverso la voce *Crea* → *Tabella*, e assegnando a ciascuna i nomi dei campi e il tipo di dati attinenti.

Le stesse sono state relazionate tramite il comando *Strumenti database* → *Relazioni* [Figura 199].

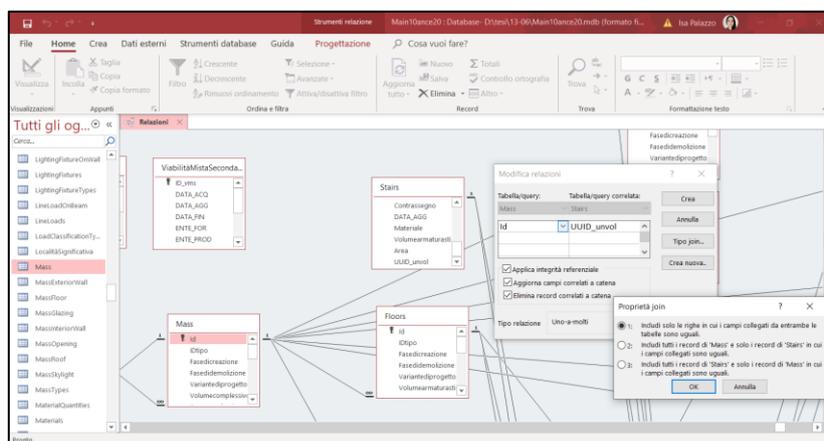


Figura 199 - Procedura di realizzazione delle relazioni.

Sono state utilizzate relazioni uno-a-molti e molti-a-molti. In particolare, quest'ultime, poiché non consentite in maniera diretta dai DBMS, sono state scomposte in due relazioni uno-a-molti, utilizzando una terza tabella.

È da sottolineare che sono associabili solo campi dello stesso formato e che il tipo di dati "Numerico" di *Access* è relazionabile unicamente a quello "Intero" scelto nella realizzazione dei parametri condivisi.

Inoltre, i campi, interessati dalla relazione, non devono necessariamente avere lo stesso nome, ma è fondamentale che il campo della tabella sorgente sia chiave primaria.

Dopo aver effettuato tutte le relazioni si è, in conclusione, ottenuto l'intero schema del *database* [Figura 200] visionabile nell'Allegato A3.

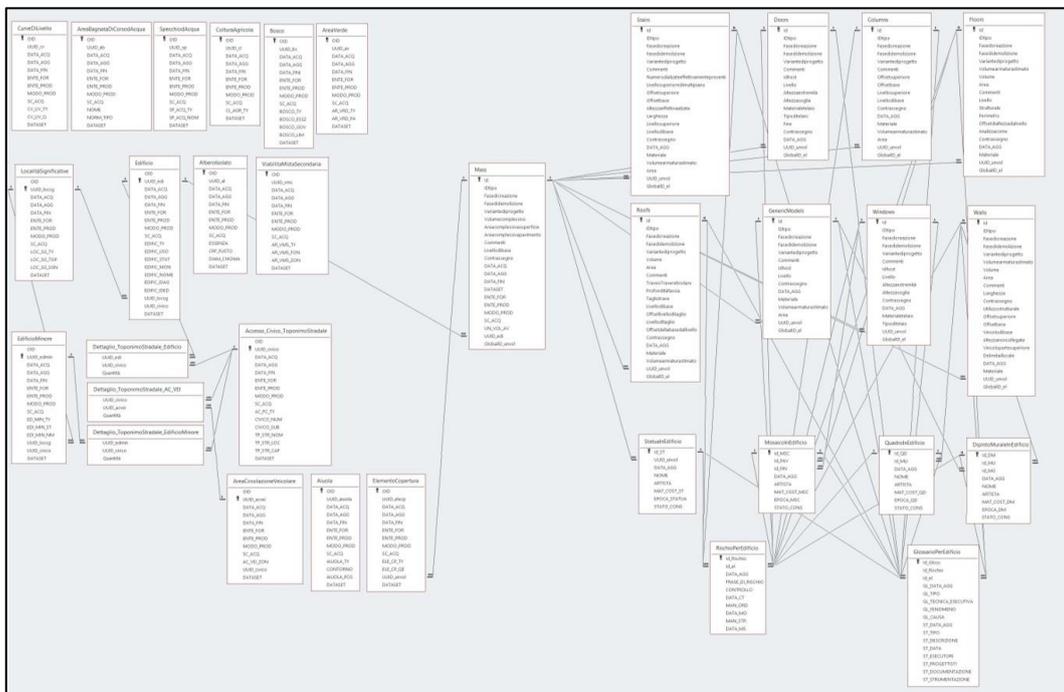


Figura 200 – Schema del *database* "Main10ance20" in *Microsoft Access*.

Si è proceduto, dunque, alla compilazione di alcuni dati all'interno del *database*, in ambiente *Microsoft Access*, quali ad esempio quelli relativi all'entità "Mass" e all'istanza "Muro Edificio circolare" [Figura 201 e Figura 202].

Volutamente, per la tabella "Mass", si è tralasciato il campo "UN_VOL_AV", rappresentante l'altezza dei volumi, per poi effettuare l'*editing* in ambiente *Revit* [Figura 203 e Figura 204].

Vincolodibias	Altezzanoncollegata	Vincoloparte	Deliv	DATA_AGG	Materiale	UUID_unvol	GlobalID_el	Fare clic per aggiungere
139271	8,0703			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Frontale Pronao	
139271	8,0703			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Laterale Pronao Destra	
139271	8,0703			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Ingresso	
139271	8,0703			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Laterale Pronao Sinistra	
				12/04/2020	Marmo	737147	Volta 2	
139351	3,08841898500167			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Pronao retro	
				12/04/2020	Marmo	737147	Volta 1	
139351	0,592959057723846			12/04/2020	Marmo	737147	Muro Pronao retro	
				13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Edificio circolare	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 7	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 8	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 1	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 2	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 3	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 4	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 5	
358359	2,33728405310448	370735		13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Lantenino 6	
139271	8,0703			13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Adiacente Ingresso Destra	
139271	8,0703			13/04/2020	Intonaco	736138	Muro Adiacente Ingresso Sinistra	
				13/04/2020	Intonaco	736138	Parete irregolare interna	

Figura 201 - Compilazione in ambiente Microsoft Access dell'entità "Walls".

DATA_ACQ	DATA_AGG	DATA_FIN	DATASET	ENTE_FOR	ENTE_PROD	MODO_PR	SC_ACQ	UN_VOL_AV	UUID_edi	GlobalID_unvol
2015 - 2016 - 2017	15/05/2020	16/05/2020	CityGML-IFC	Politecnico di T.	Politecnico di Tori Revit	1:100			Edificio Tabor	Unità Volumetrica 1
2015 - 2016 - 2017	15/05/2020	16/05/2020	CityGML-IFC	Politecnico di T.	Politecnico di Tori Revit	1:100			Edificio Tabor	Unità Volumetrica 2

Figura 202 - Compilazione in ambiente Microsoft Access dell'entità "Mass".

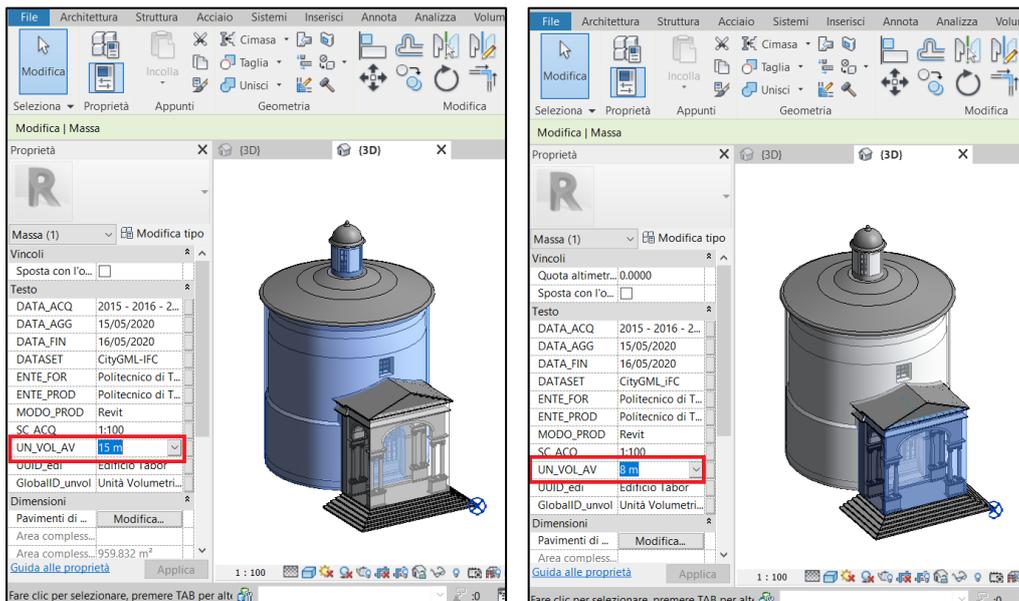


Figura 203 - Compilazione, in ambiente Revit, del campo "UN_VOL_AV".

	DATA_AGG	DATA_FIN	DATASET	ENTE_FOR	ENTE_PROD	MODQ_PROI	SC_ACQ	UN_VOL_AV	UUID_edi	GlobalID_um
LocalitàSignificative	15/05/2020	16/05/2020	CityGML-IFC	Politecnico di T	Politecnico di T	Revit	1:100	15 m	Edificio Tabor	Unità Volumetr
LocalitàSignificative	15/05/2020	16/05/2020	CityGML_IFC	Politecnico di T	Politecnico di T	Revit	1:100	8 m	Edificio Tabor	Unità Volumetr

Figura 204 - Visualizzazione, in *Microsoft Access*, del campo "UN_VOL_AV" compilato.

7.4 Visualizzazione del progetto Main10ance su *ArcGIS Desktop*

L'intento è quello di visualizzare, su *ArcGIS Desktop*, il progetto Main10ance organizzato seguendo i LOD precedentemente illustrati.

Per la realizzazione del LOD 0 sono stati scaricati dal Geoportale della Regione Piemonte²¹, identificando l'area di interesse, i seguenti *Shapefile*:

- relativo alle "Curve di livello" (cv_liv_class_2019);
- relativo alle "Località significative" (loc_sg_2019);
- relativo a "Edificio" (edifc_2019);
- relativo a "Edificio minore" (edi_min_2019);
- relativo a "Toponimo stradale-Località-Civico" (acc_pc_civico_tp_str_2019);
- relativo a "Area di circolazione veicolare" (ac_vei_2019);
- relativo a "Area bagnata di corso d'acqua" (ab_cda_vert_2019);
- relativo a "Specchio d'acqua" (sp_acq_vert_2019);
- relativo a "Coltura agricola" (cl_agr_2019);
- relativo a "Bosco" (bosco_2019);
- relativo a "Area verde" (ar_vrd_2019).

Caricandoli con un semplice *drag and drop* all'interno di *ArcScene*, si è completato il LOD 0 aggiungendo il solo dato *raster* del DTM fornito dal gruppo di ricerca del DIATI [Figura 205 e Figura 206].

²¹ <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/index.jsp>

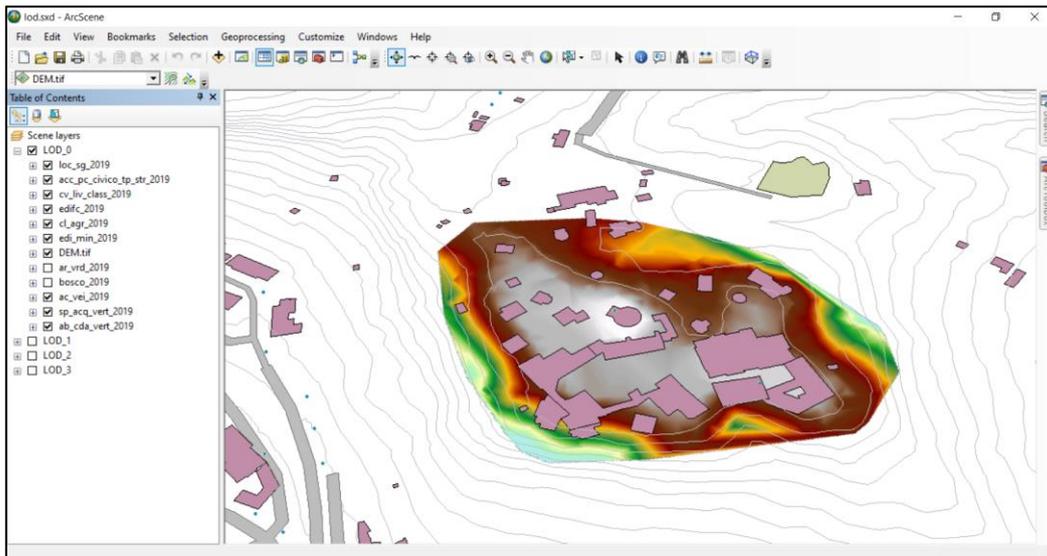


Figura 205 - Inserimento del DTM in formato *raster* all'interno del LOD 0.

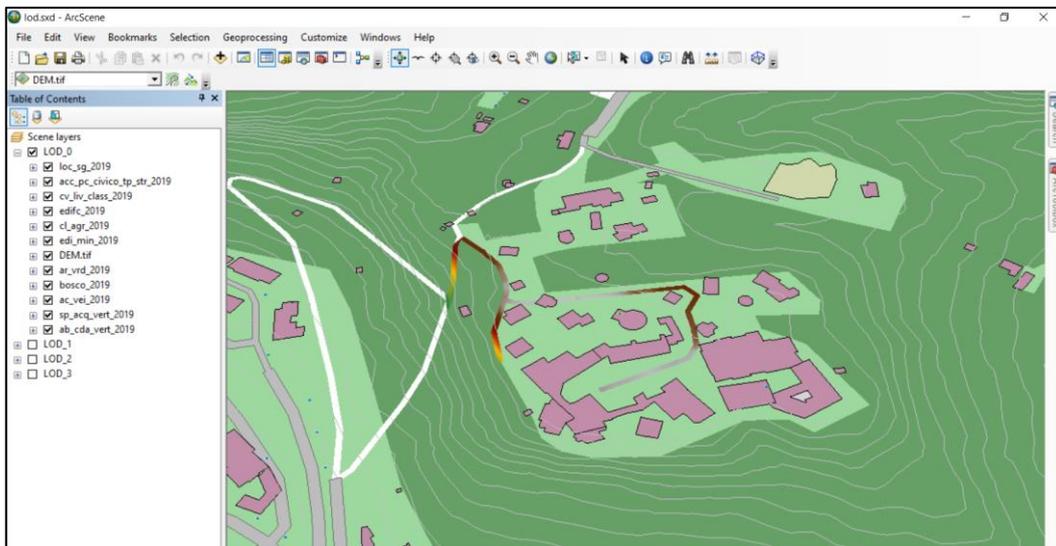


Figura 206 – LOD 0 in *ArcScene*.

Per quel che riguarda il LOD 1, è stato creato con i soli dati a disposizione, scaricati ancora dal Geoportale della regione Piemonte, ovvero, con gli *Shapefile*:

- relativo a “Unità Volumetrica” (*un_vol_2019*);
- relativo a “Viabilità mista secondaria” (*ar_vms_2019*).

Inseriti, dunque, i *file* all'interno del *Table of Contents* di *ArcScene*, si è proceduto all'estrusione dei poligoni rappresentanti gli edifici.

Quest'ultima è stata effettuata modificando la scheda *Extrusion* nelle proprietà del *layer* e associando, come valore di estrusione, il campo “UN_VOL_AV” contenente, appunto, l'altezza dei volumi [Figura 207 e Figura 208].

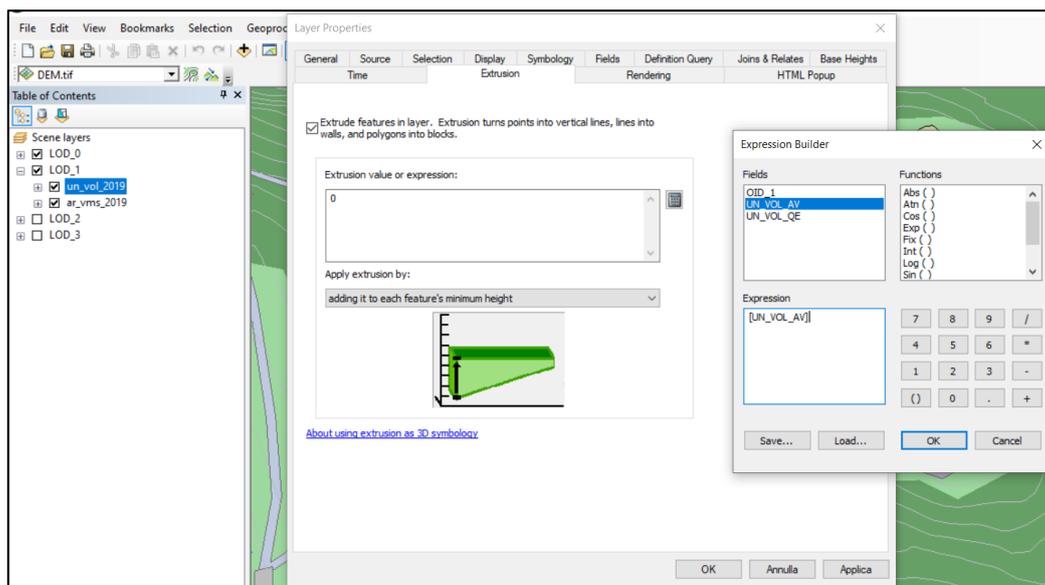


Figura 207 - Impostazioni di estrusione delle unità volumetriche appartenenti al LOD 1.

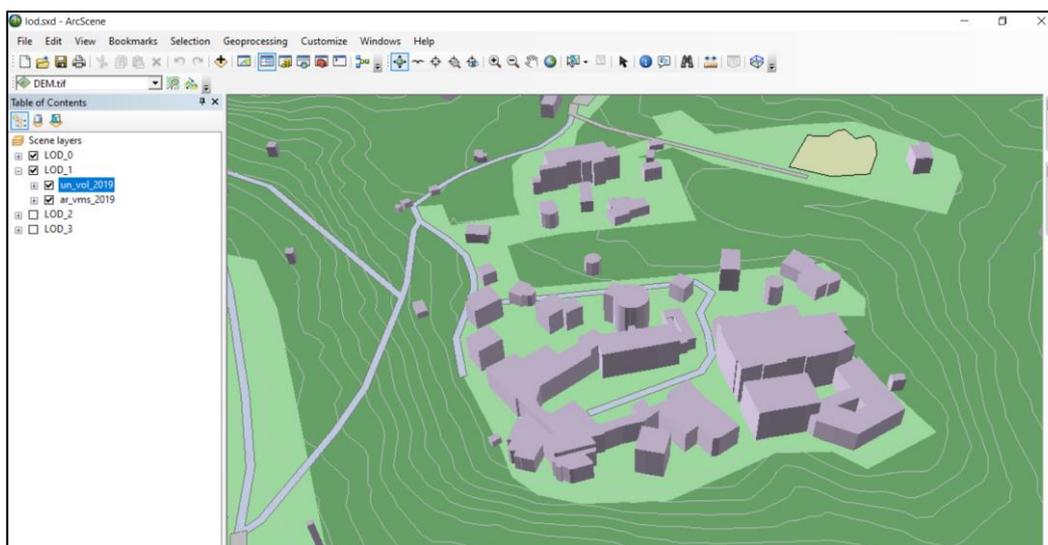


Figura 208 – LOD 1 in ArcScene.

7.4.1 Visualizzazione dei dati spaziali della Cappella 17 su ArcGIS Desktop

Per raggiungere il LOD 2 si è dovuto, a priori, attribuire al modello della Cappella 17 le coordinate originarie e non traslate. Pertanto, sono state riconsiderate le coordinate individuate per il punto angolare della gradinata d'ingresso (riportate nel paragrafo 6.2) e aggiunte le quantità, in valore assoluto, di cui era stata traslata la nuvola implementata (esprese all'inizio del capitolo 6). Le coordinate ottenute sono state, infine, assegnate al punto base di progetto del modello tridimensionale, esportato, successivamente, in formato .ifc [Figura 209].

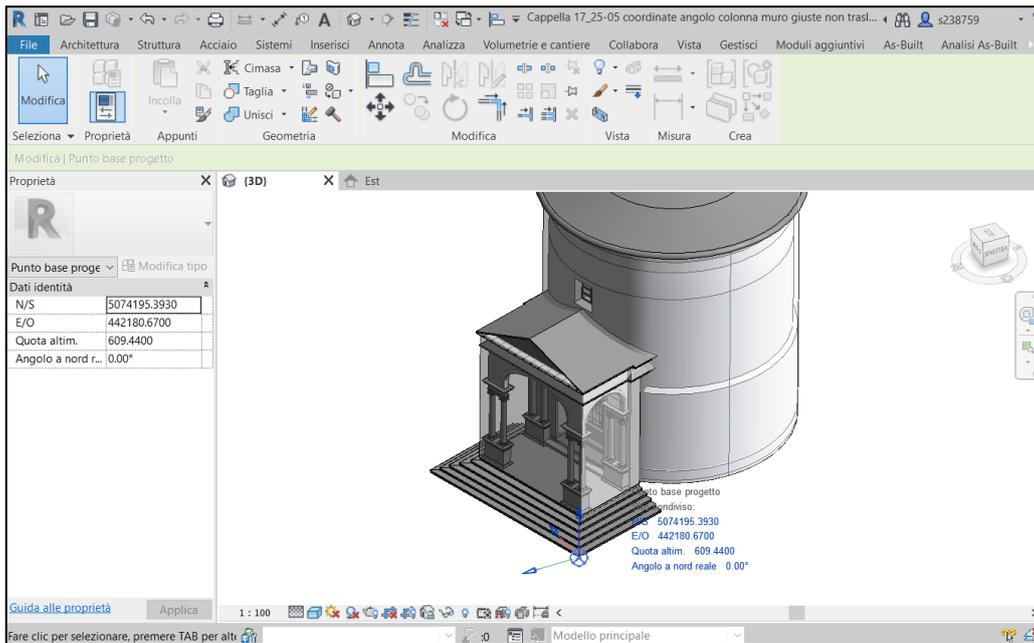


Figura 209 - Georeferenziazione del modello della Cappella 17.

Allo scopo di visualizzare il suddetto modello all'interno di *ArcScene* è stata necessaria la preventiva installazione e abilitazione dell'estensione *ArcGIS Data Interoperability*, attraverso il percorso *Customize* → *Extensions*. *ArcGIS Data Interoperability* è un'estensione di *ArcGIS Desktop* sviluppata da una collaborazione tra ESRI e *SAFE Software*, basandosi sull'applicazione FME di quest'ultima.

Tale estensione ha permesso l'utilizzo dello strumento *Quick Import* presente tra i *Data Interoperability tools*, a loro volta contenuti, all'interno dell'*Arc Toolbox*.

Il *Quick Import* consente di importare *file* provenienti da più fonti e in diversi formati, trasformandoli in Geodatabase; ha, pertanto, permesso di convertire anche il modello tridimensionale in questione.

Si è proceduto, dunque, a specificare il formato di dati prescelto, a selezionare il *file* della Cappella 17 precedentemente estratto, a impostare il sistema di coordinate UTM–WGS84, con fuso di appartenenza “32N”, e i parametri dell'IFC *file* come da immagine seguente [Figura 210].

Mediante *Add Data* sono stati aggiunti, al *Table of contents*, i diversi *layer* in cui il *file* trasformato è stato ripartito. Si è constatata, tuttavia, la perdita delle informazioni alfanumeriche create mediante i parametri condivisi in ambiente *Revit*.

La suddivisione in *layer*, inoltre, nonostante la possibilità di impostare le classi di esportazione IFC all'interno dell'ambiente *Revit* mediante il comando *Opzioni IFC*,

non rispetta quella dei singoli oggetti modellati, bensì la maggior parte degli oggetti sono raggruppati per categorie all'interno di un unico *layer*; è il caso, ad esempio, degli oggetti categorizzati come “muri”, “finestre”, “porte” e “scale”, contenuti rispettivamente nei *layer* “IfcWall_surface”, “IfcWindow_surface”, “IfcDoor_surface” e “IfcStairFlight_surface”.

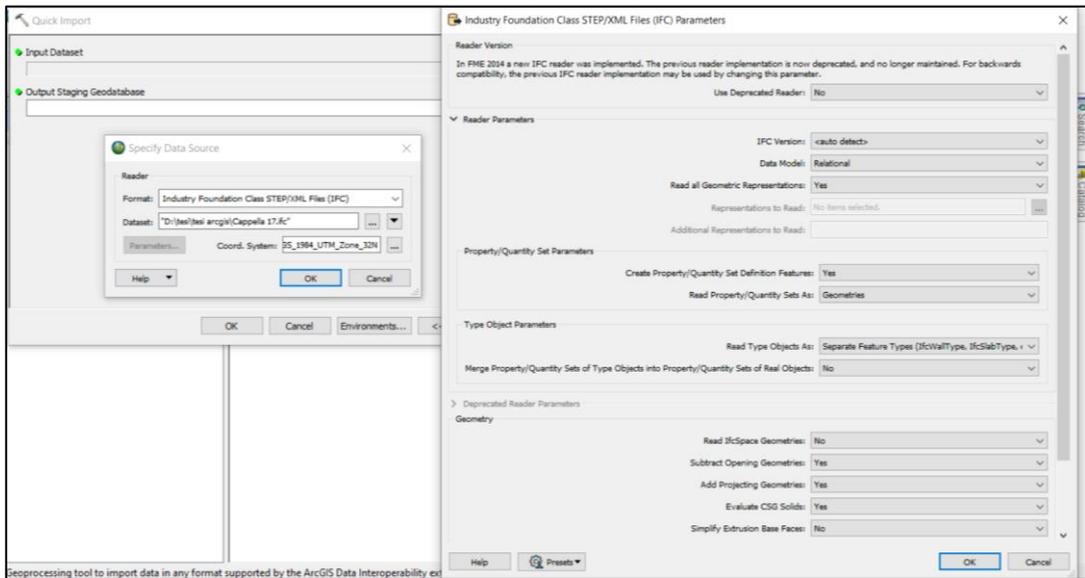


Figura 210 - Procedura di importazione in *ArcScene* del modello della Cappella 17 mediante lo strumento *Quick Import*.

Il *layer* “IfcRoof_surface”, invece, include tutte le coperture ad eccezione di quella del pronao, inserita, insieme ai pavimenti all'interno del *layer* “IfcSlab_surface”. In ultimo, i due volumi dell'unità volumetrica e gli oggetti modellati come famiglie caricabili rientrano tutti nell'unico *layer* “IfcBuildingElementProxy_surface” [Figura 211].

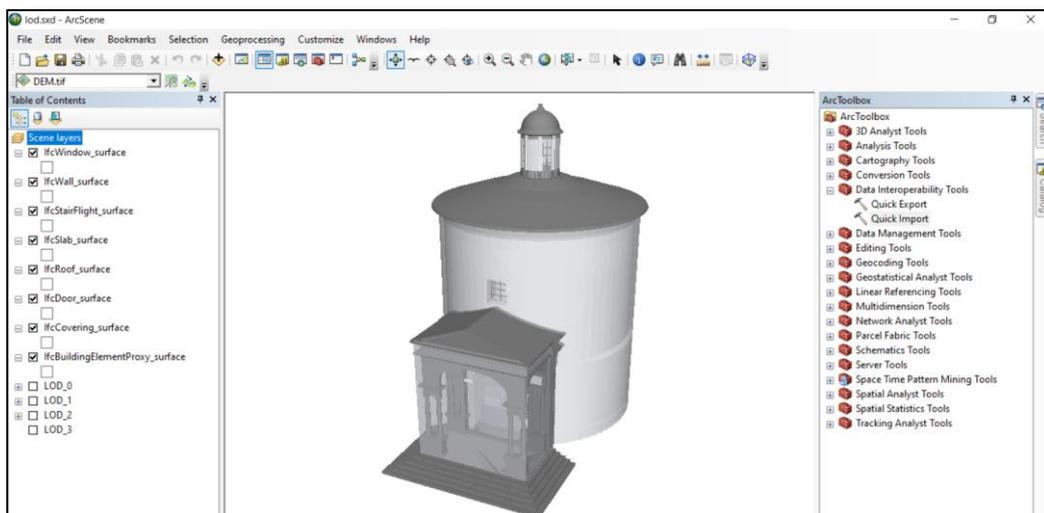


Figura 211 - Inserimento del modello della Cappella 17 in *ArcScene* e visualizzazione dei diversi *layer*.

Considerata tale suddivisione, è stato necessario riprendere il *file* relativo alla sola unità volumetrica, descritto nel paragrafo 5.2.8, e generare, in ambiente *Revit*, altri 3 progetti architettonici attinenti alle coperture, al modello dettagliato della Cappella 17 privo di unità volumetrica e interni e, in ultimo, al muro interno e ai cubi, rappresentati, rispettivamente, il monte Tabor e le statue. Ciascun *file*, con coordinate del punto base di progetto, ovviamente, non traslate, è stato esportato in formato *.ifc*.

È da sottolineare che si è mantenuto, comunque, inalterato il *file* del modello utilizzato per l'implementazione del *database*.

La geometria del LOD 2 è stata realizzata inserendo, in *ArcScene*, i *layer* relativi a unità volumetrica, coperture e scale, ottenuti, dai suddetti *file*, con medesimo procedimento, precedentemente illustrato, e mediante lo strumento *Quick Import*.

In realtà, al momento dell'aggiunta, i *layer* risultavano traslati verticalmente rispetto a quelli dei LOD 0 e LOD 1, probabilmente in seguito al valore della quota $z=609,44$ m associato a essi [Figura 212]; si è proceduto ad annullare questo *offset* all'interno della scheda *Base Heights* delle proprietà [Figura 213 e Figura 214].

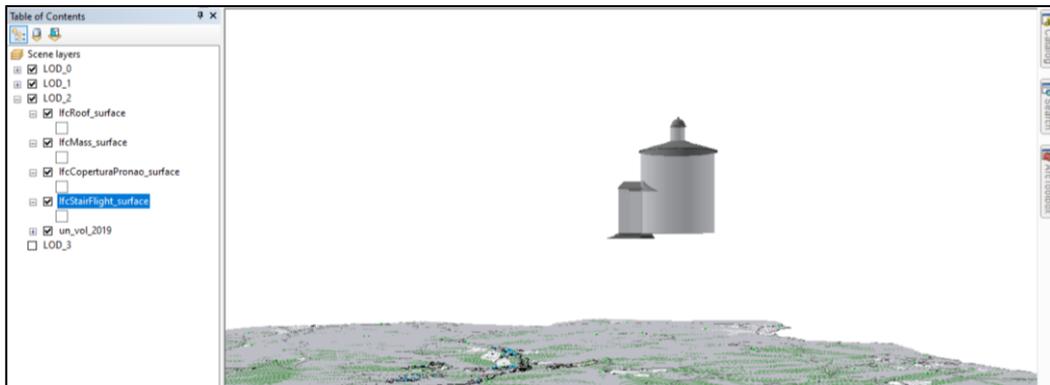


Figura 212 - Inserimento delle geometrie del LOD 2 in *ArcScene*.

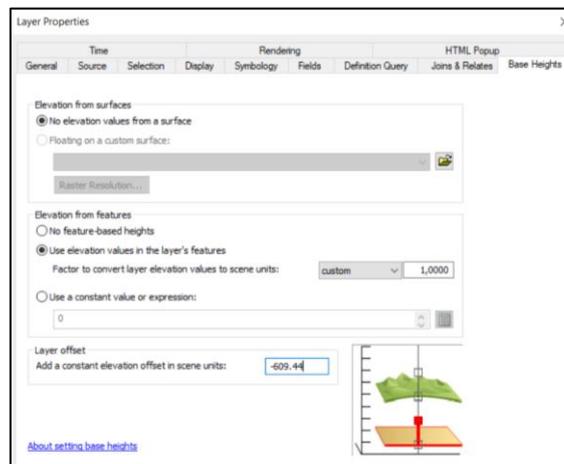


Figura 213 - Impostazioni della finestra *Layer Properties* per l'annullamento dell'*offset* dei *layer*.

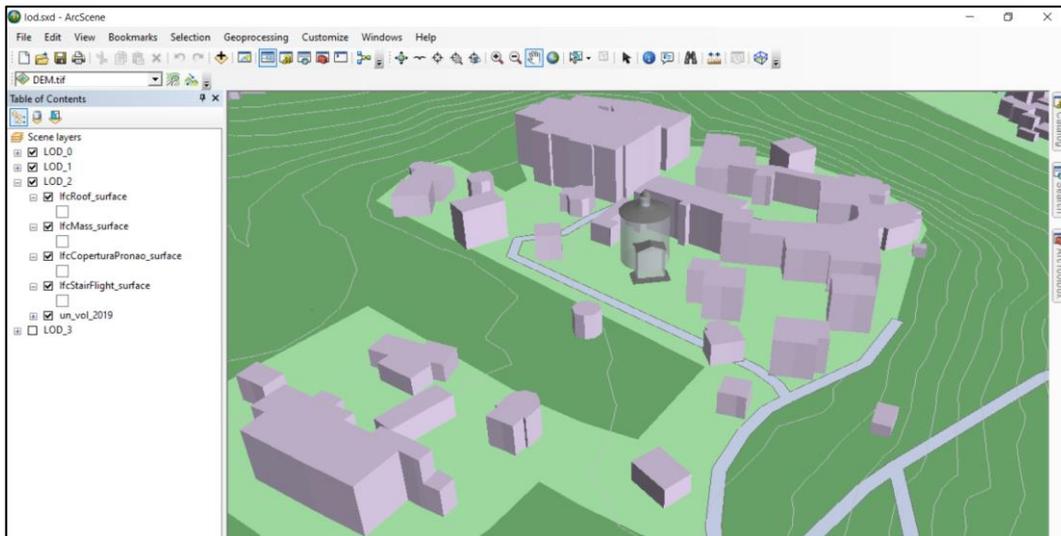


Figura 214 – LOD 2 in *ArcScene*.

Infine, la visualizzazione dei LOD 3 e LOD 4 si è ottenuta aggiungendo i *layer* relativi agli elementi di dettaglio della Cappella 17, nello specifico, gli interni sono stati considerati solo per il completamento del secondo [Figura 215 e Figura 216].

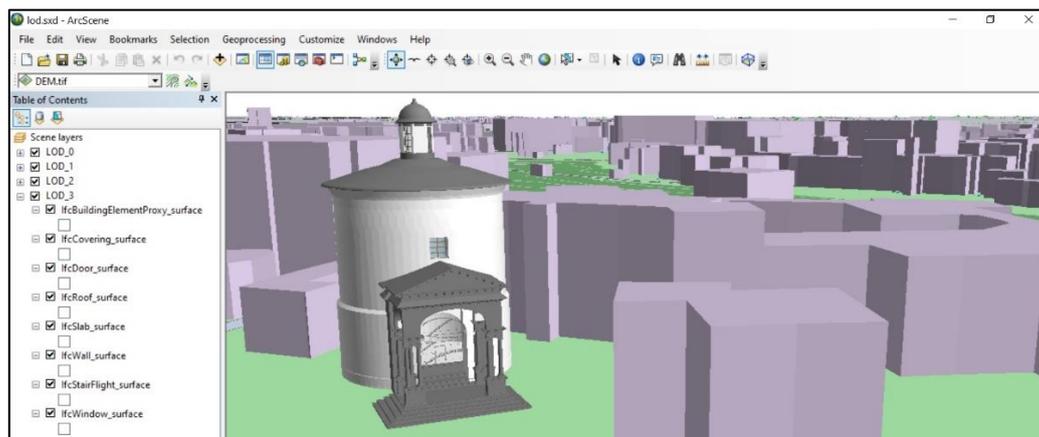


Figura 215 – LOD 3 in *ArcScene*.

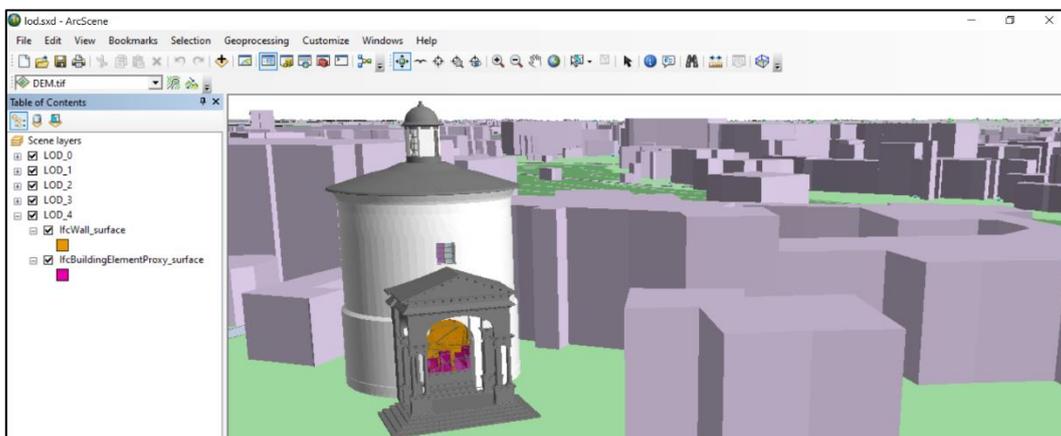


Figura 216 - LOD 4 in *ArcScene*.

7.4.2 Visualizzazione dei dati alfanumerici della Cappella 17 su ArcGIS Desktop

Ad alcuni elementi geometrici della cappella 17 sono stati associati, in ArcScene, i dati alfanumerici compilati all'interno del database "Main10ance20" di Microsoft Access. A tal fine, si è sfruttata la connessione OLE DB creata precedentemente, attraverso il procedimento descritto nel paragrafo 7.2.5.

Per stabilire il suddetto collegamento, dopo aver avviato l'editing di ciascun layer, nella relativa tabella degli attributi, si è modificato il campo *ObjectType* con il solo identificativo alfanumerico degli elementi. Quest'ultimi, attraverso una relazione del tipo *Join* (uno-a-uno), sono stati connessi al database "Main10ance20". Nel caso, ad esempio, del layer "IfcMass_Surface" nel campo "ObjectType" sono stati mantenuti gli identificativi "Unità Volumetrica 1" e "Unità Volumetrica 2" [Figura 217 e Figura 218].

OBJECTID	SHAPE	Name	Descriptio	ObjectType	Tag
1	MultiPatch	Unità Volumetrica 1:Unità Volumetrica 1:449580	<Null>	Unità Volumetrica 1:Unità Volumetrica 1	449580
2	MultiPatch	Unità Volumetrica 2:Unità Volumetrica 2:450330	<Null>	Unità Volumetrica 2:Unità Volumetrica 2	450330

Figura 217 - Tabella degli attributi del layer "IfcMass_Surface" invariata.

OBJECTID	SHAPE	Name	Descriptio	ObjectType	Tag
1	MultiPatch	Unità Volumetrica 1:Unità Volumetrica 1:449580	<Null>	Unità Volumetrica 1	449580
2	MultiPatch	Unità Volumetrica 2:Unità Volumetrica 2:450330	<Null>	Unità Volumetrica 2	450330

Figura 218 - Modifica del campo "Object Type" con identificativo alfanumerico.

Selezionata l'opzione *Join*, nella relativa finestra, è stato impostato come campo del layer "ObjectType", si è individuata la tabella "Mass" dalla connessione OLE DB di "Main10ance20" e, infine, si è scelto il campo "GlobalID_unvol" della tabella sorgente [Figura 219]. Come risultato, utilizzando il campo comune, si è ottenuta l'unione dei due dataset [Figura 220].

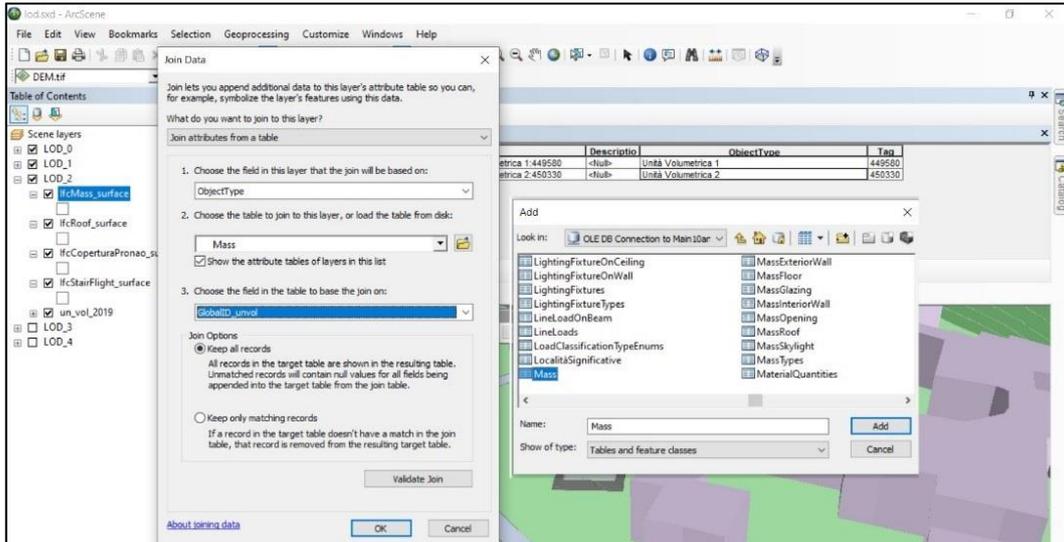


Figura 219 - Impostazioni della finestra di *Join*.

LevelID	Contrassegno	DATA_ACQ	DATA_AGG	DATA_FIN	DATASET	ENTE_FOR	ENTE_PROD	MODULO_PROD	SC_ACQ	UN_VOL_AV	UUID_edi	GlobalID_univol
1	-Hub-	2015 - 2016 - 2017	15/05/2020	16/05/2020	CityGML_IFC	Politecnico di Torino	Politecnico di Torino	Revit	1:100	15 m	Edificio Tabor	Unità Volumetrica

Figura 220 - Tabella degli attributi del layer "IfcMass_Surface" successiva all'operazione di *Join*.

Identificando i due volumi costituenti l'unità volumetrica è possibile, dunque, visualizzarne le caratteristiche attribuite [Figura 221 e Figura 222].

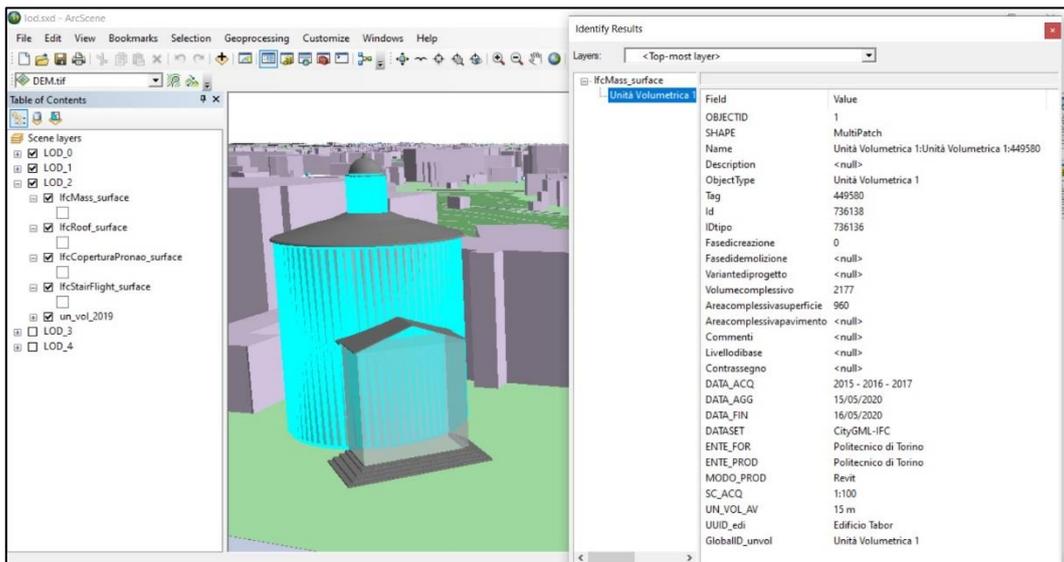


Figura 221 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 1" successivo all'operazione di *Join*.

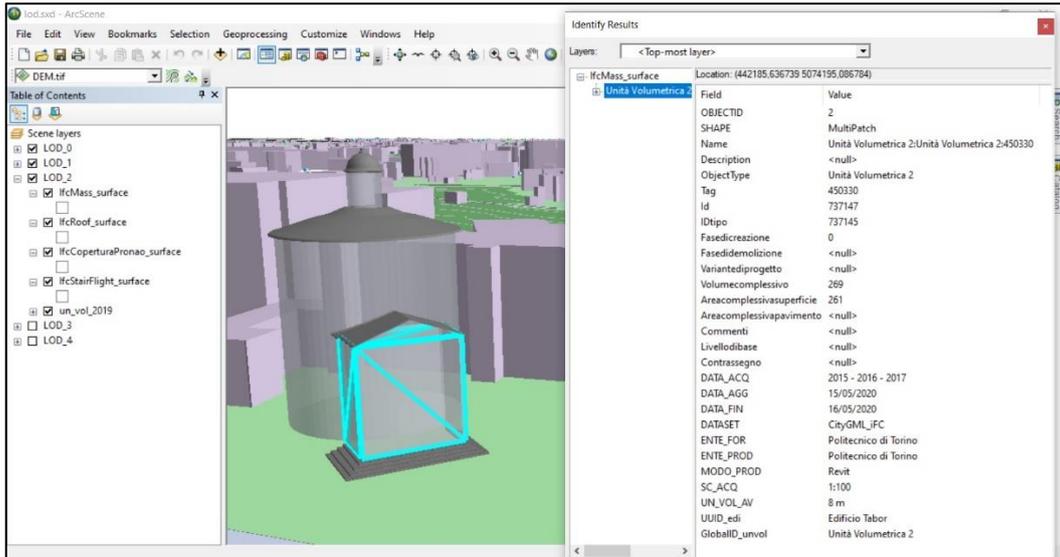


Figura 222 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 2" successivo all'operazione di Join.

Medesima operazione è stata effettuata per il layer "IfcWall_Surface", in questo caso, impostando la tabella "Walls" della connessione OLE DB come sorgente e come campi comuni "ObjectType" e "GlobalID_el" [Figura 223 e Figura 224].

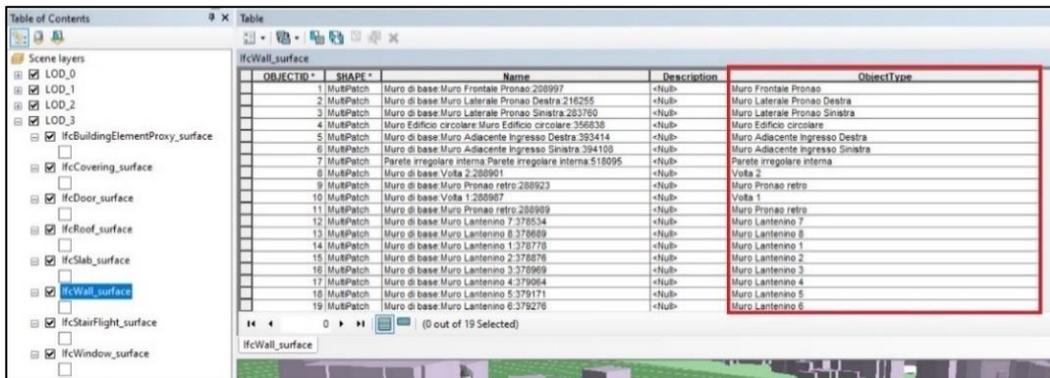


Figura 223 - Modifica del campo "Object Type" con identificativo alfanumerico.

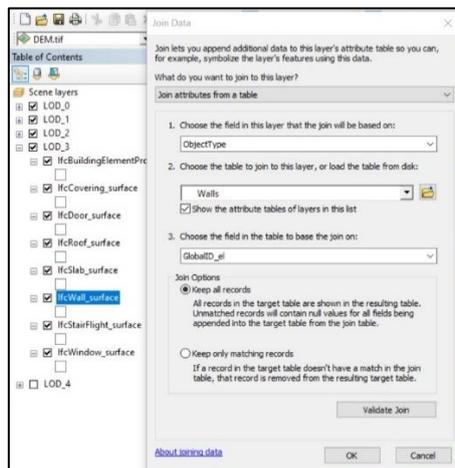


Figura 224 - Impostazioni della finestra di Join.

Allo stesso modo, l'identificazione dei muri del modello tridimensionale restituisce le informazioni attinenti [Figura 225 e Figura 226].

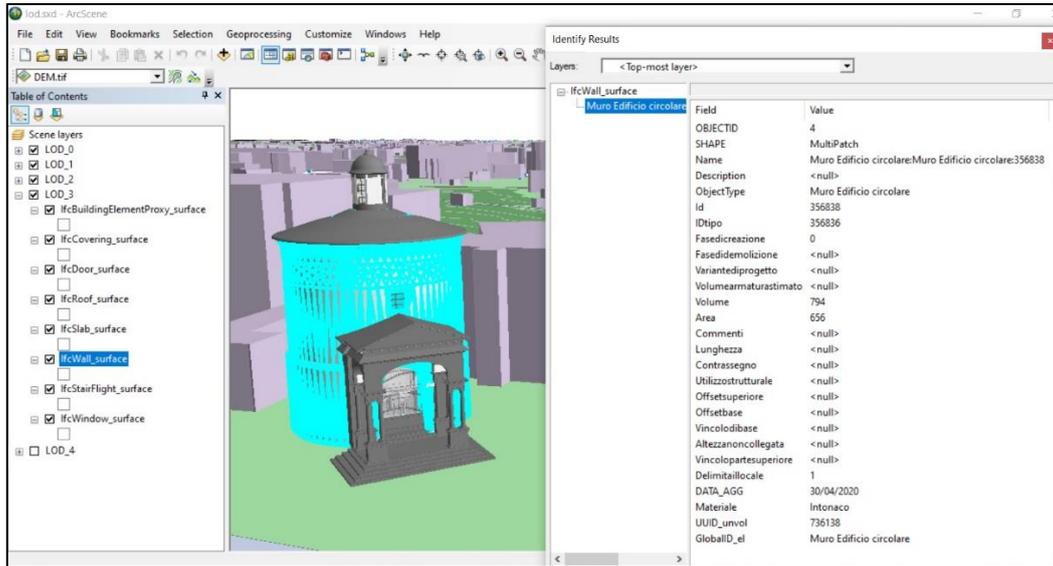


Figura 225 - Risultato dell'identificazione del "Muro Edificio circolare" successivo all'operazione di Join.

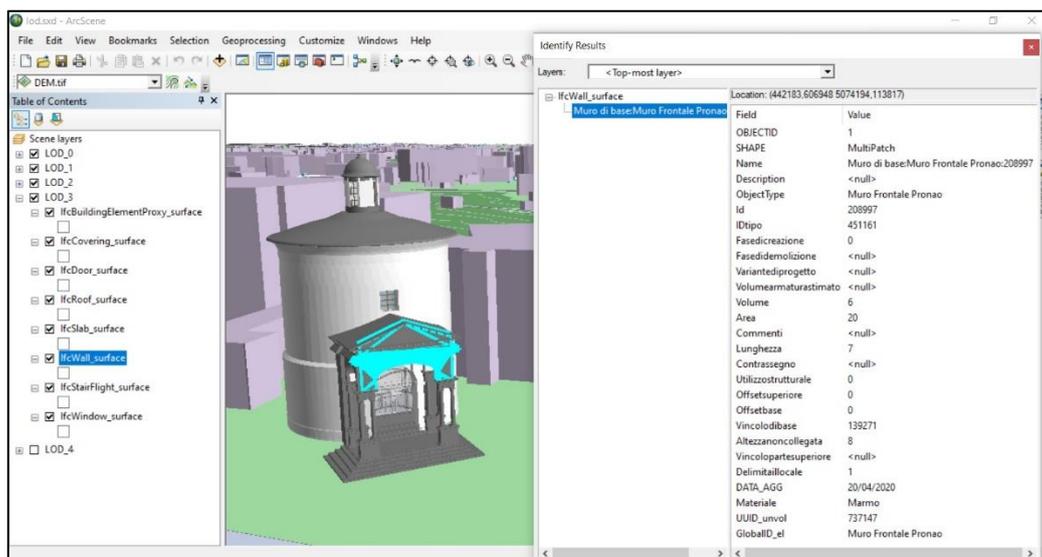


Figura 226 - Risultato dell'identificazione del "Muro Frontale Pronao" successivo all'operazione di Join.

In ultimo, è stato possibile associare i volumi dell'unità volumetrica con i diversi muri dell'edificio, utilizzando una relazione del tipo *Relate* (uno-a-molti). Nel dettaglio, si è correlato il campo "Id" della tabella degli attributi del layer "IfcMass_Surface", aggiunto tramite il *Join*, a "UUID_unvol" della tabella "Walls" di "Main10ance20" [Figura 227].

Di conseguenza, identificando ciascun volume dell'unità volumetrica, si ottengono informazioni, organizzate gerarchicamente, in merito agli stessi e agli elementi in cui sono scomponibili [Figura 228].

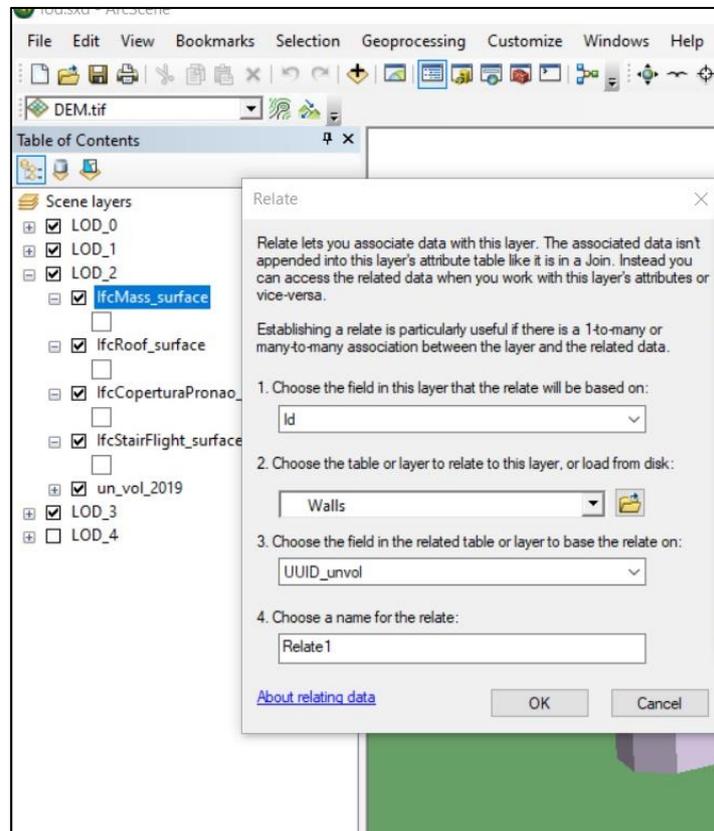


Figura 227 - Impostazioni della finestra *Relate*.

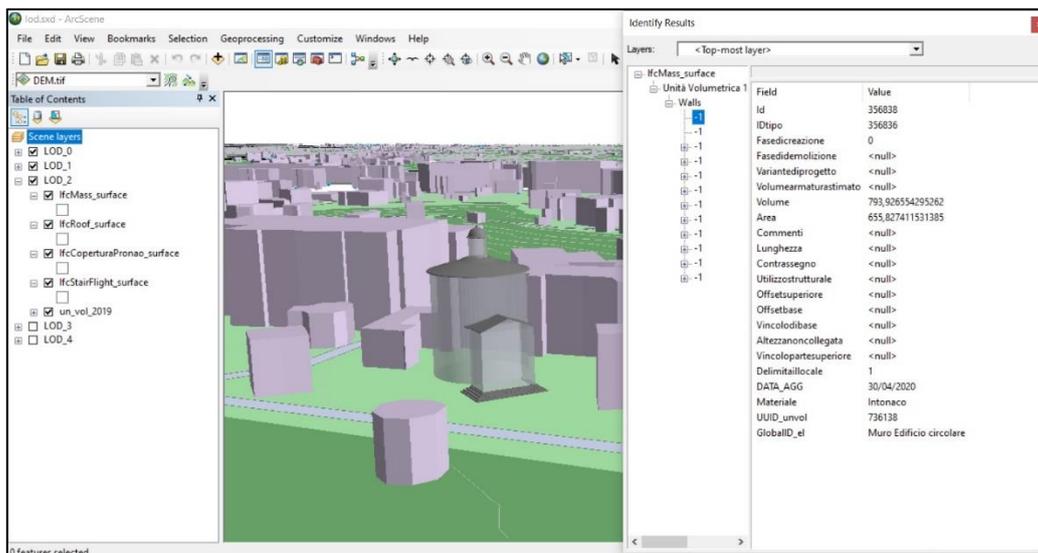


Figura 228 - Risultato dell'identificazione di "Unità Volumetrica 1" successivo all'operazione di *Relate*.

Ovviamente, aggiornando i dati, in ambiente *Revit* [Figura 229] o *Microsoft Access* [Figura 230], è possibile visualizzarne le modifiche all'interno del *software ArcScene* [Figura 231].

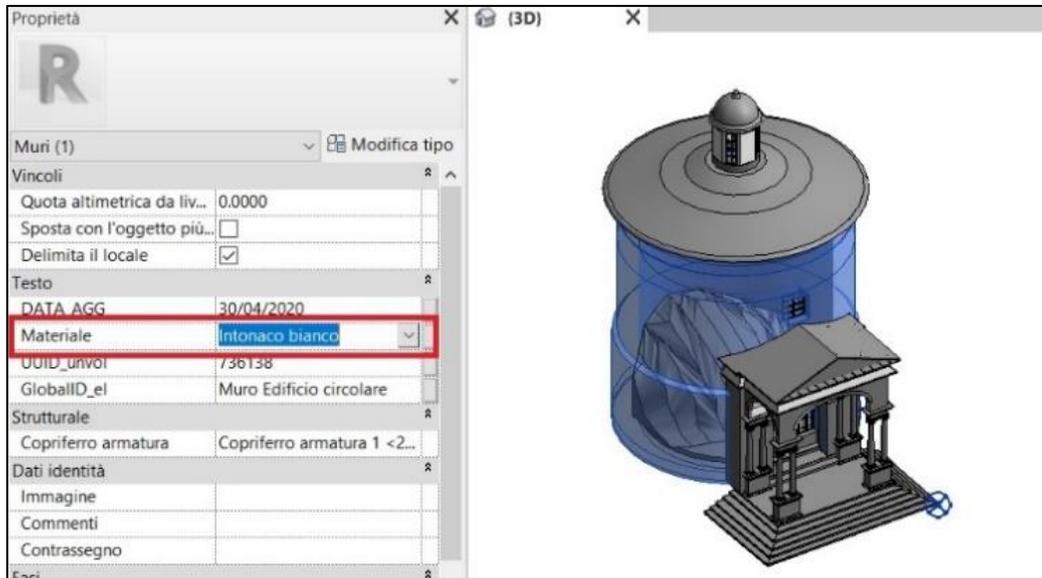


Figura 229 - Aggiornamento dei dati in ambiente *Revit*.

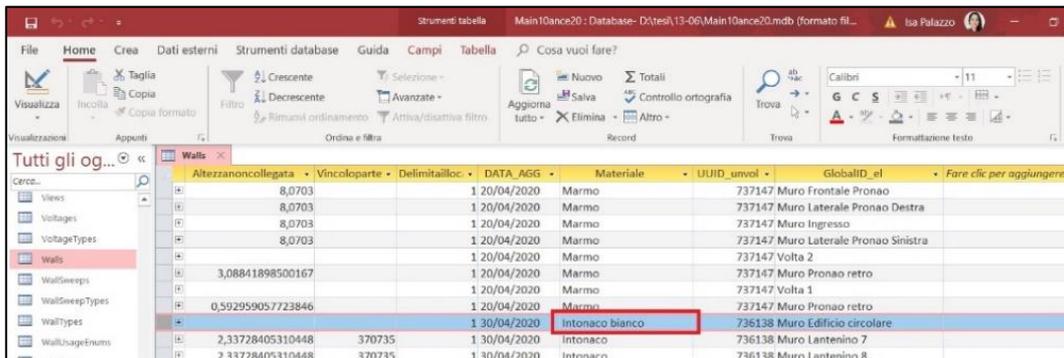


Figura 230 - Visualizzazione dei dati aggiornati in ambiente *Microsoft Access*.

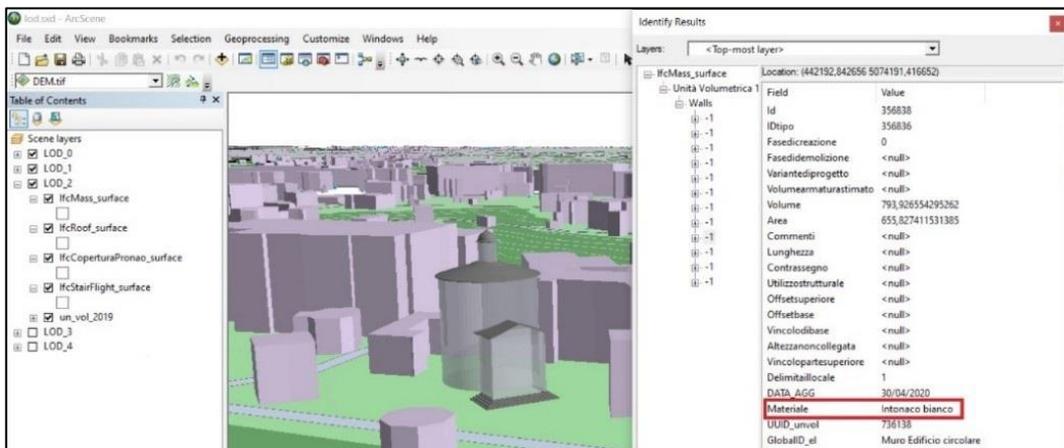


Figura 231 - Visualizzazione dei dati aggiornati in ambiente *ArcScene*.

Conclusioni

Gli studi svolti per il presente lavoro di tesi hanno portato alla realizzazione di un sistema informativo tridimensionale e multi-scala del Sacro Monte di Varallo. Le analisi effettuate sono solo una parentesi dell'attività di ricerca, in corso d'opera, atta a valorizzare e tutelare la rete dei diversi complessi devozionali caratteristici dell'arco alpino, oltre che a definire uno strumento a supporto del piano di manutenzione programmata di questi siti UNESCO.

L'obiettivo principale è stato quello di garantire la consultazione e compilazione trasversale dei dati, utilizzando *software* quali *Autodesk Revit*, *Microsoft Access* e *ArcGis Desktop* e permettendo il coinvolgimento, in tali attività, di una più ampia utenza.

Per la realizzazione del sistema informativo sono stati considerati livelli di dettaglio, nati dall'unione di infrastrutture di dati a scala territoriale ed architettonica, proposti, in particolare, dagli *standard* CityGML e IFC.

Fulcro dello strumento operativo è il *database*, implementato all'interno di *Microsoft Access*, partendo dall'esportazione, tramite il *plug-in Revit DB Link*, dei dati intrinseci al modello tridimensionale della Cappella 17- La Trasfigurazione, realizzato con il *software Revit* e oggetto di particolare attenzione in questo lavoro.

La realizzazione del suddetto modello è stata effettuata a partire da una nuvola di punti, ottenuta come integrazione del risultato di elaborazione di diverse campagne di rilievi topografici, LIDAR e fotogrammetrici tramite UAV.

Nel dettaglio, per mezzo dei *software Faro Scene* e *Cloud Compare*, sono state processate scansioni *laser scanner*, relative all'intero Sacro Monte di Varallo, ricavando, da quella generale, una nuvola di punti del singolo edificio. In seguito al confronto tra quest'ultima e una nuvola fotogrammetrica esistente, se ne è ricavata la definitiva della Cappella 17, mantenendo le sole coperture rappresentate in quella fotogrammetrica.

In aggiunta, a partire dalla nuvola di punti fotogrammetrica implementata per una più ampia rappresentazione del complesso devozionale, è stato realizzato, con il *software 3DReshaper*, il DTM dell'area, quale superficie di appoggio per un modello federato che rappresenta al meglio il concetto di collaborazione, fondamento della metodologia BIM.

In un progetto, organizzato in LOD e realizzato mediante il *software ArcGIS Desktop*, per mezzo dell'estensione *Data Interoperability* sono stati resi visualizzabili i dati spaziali della Cappella 17; attraverso una connessione OLE DB tra il *software* e il *database* è consentita la consultazione dei dati alfanumerici e delle eventuali modifiche apportate a quest'ultimi.

A lavoro concluso sono state definite nella tabella a seguire [Tabella 11] le potenzialità e criticità del metodo utilizzato per l'ottenimento del modello informativo tridimensionale.

FASE DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DEL RILIEVO	
CRITICITÀ	POTENZIALITÀ
Tempo di elaborazione dei dati di rilievo piuttosto lungo;	Possibilità di interrogare nel tempo i dati del rilievo;
Le informazioni ottenute dal rilievo sono limitate alla rappresentazione delle sole superfici dell'edificio e pertanto non sufficienti a caratterizzare scale di dettaglio maggiori dell'1:100.	Reperimento in tempi brevi di grandi quantità di dati geometrici e di posizione dall'elevata precisione.
FASE DI MODELLAZIONE	
CRITICITÀ	POTENZIALITÀ
Assenza di specifici strumenti del <i>software Revit</i> per la modellazione di edifici storici che comporta difficoltà nella modellazione di elementi architettonici complessi e non sempre consente il completo mantenimento delle precisioni della nuvola di punti;	Possibilità di assegnare agli elementi modellati parametri geometrici che consentano di guidare forme e proporzioni all'interno del modello;
Impossibilità di inserimento della nuvola di punti nell' <i>Editor delle Famiglie e delle Masse concettuali</i> .	Realizzazione di modelli che non si limitino alla sola rappresentazione tridimensionale, ma contengano informazioni alfanumeriche, geometriche e di posizione;
	Esportazione del modello in formati aperti quali l'IFC.
FASI DI IMPLEMENTAZIONE DEL DATABASE MULTI-SCALA E VISUALIZZAZIONE DEI DATI	
CRITICITÀ	POTENZIALITÀ
Limitazioni del <i>plug-in Revit DB Link</i> per l'esportazione della struttura dati del modello nel <i>software Microsoft Access</i> versione 2016;	Visualizzazione e modifica trasversale dei dati alfanumerici, all'interno dei <i>software Revit e Microsoft Access</i> ;
Limitazioni del <i>plug-in Revit DB Link</i> per l'importazione, in ambiente <i>Revit</i> , di strutture dati modificate rispetto all'originale;	Possibilità di visualizzazione, in <i>ArcGIS Desktop</i> , dei dati alfanumerici gestiti all'interno del <i>software Microsoft Access</i> mediante connessioni OLE DB;
Impossibilità di gestione dei dati spaziali all'interno di <i>Microsoft Access</i> ;	Possibilità di visualizzazione, in ambiente <i>ArcGIS Desktop</i> , delle geometrie del modello importato in formato IFC;
Inesistenza di connessioni dirette tra i <i>software ArcGIS Desktop e Microsoft Access</i> ;	Mantenimento della corretta georeferenziazione, in ambiente <i>ArcGIS Desktop</i> , del modello importato in formato IFC;
Impossibilità di visualizzazione, all'interno dei <i>software Revit e Microsoft Access</i> , dei dati alfanumerici modificati in ambiente <i>ArcGIS Desktop</i> .	Possibilità di modifica, in ambiente <i>ArcGIS Desktop</i> , dei dati alfanumerici importati in formato IFC.
Incompleta visualizzazione dei dati alfanumerici esportati da ambiente <i>Revit</i> a <i>ArcGIS</i> tramite formato IFC.	
Scorretta interpretazione, in ambiente <i>ArcGIS Desktop</i> , delle categorie di appartenenza degli elementi geometrici importati in formato IFC.	

Tabella 11 – Criticità e potenzialità delle principali fasi della metodologia utilizzata.

Considerati i pro e contro della metodologia applicata, si può asserire che la stessa, senza dubbio migliorabile in molti aspetti, può comunque apportare numerosi vantaggi in termini di tempo e organizzazione dei flussi di dati legati al patrimonio storico esistente. In particolare, la compilazione automatica di *database* a partire da modelli

virtuali alla scala del costruito e la modifica trasversale dei relativi dati in differenti *software*, quali *Revit* e *Microsoft Access*, potrebbero diventare operazioni di grande ausilio per tutti gli enti coinvolti nella manutenzione e gestione di beni paesaggistici e culturali.

In studi futuri, inoltre, sarebbe utile approfondire l'operazione di esportazione e importazione diretta dei dati di modelli virtuali in DBMS capaci di implementare dati spaziali, in modo che le informazioni relative alla loro georeferenziazione non vadano perse in tali applicativi.

Bibliografia

- [1] DE FILIPPIS, E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009.
- [2] SAGGIO, A., *Architettura e modernità. Dal Bauhaus alla rivoluzione informatica*, Roma Carocci 2010.
- [3] ALESSI, G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974.
- [4] LONGO, P.G.; ZARDIN, D. (a cura di), *I Sacri Monti, Bibliografia italiana*, Atlas, Ponzano Monferrato, 2010.
- [5] LONGO, P.G., *MEMORIE DI GERUSALEMME E SACRI MONTI IN EPOCA BAROCCA*, Atlas, Ponzano Monferrato, 2010.
- [6] AMMINISTRAZIONE VESCOVILE DEL SACRO MONTE DI VARALLO, *Il Sacro Monte di Varallo. Raccolta storica dei testi delle cappelle del Sacro Monte di Varallo*, Vercelli, 2016.
- [7] SCARZELLA, P.; ZERBINATTI, M., *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea editrice, Firenze, 2009.
- [8] CECCHI R., GASPAROLI P., *PREVENZIONE E MANUTENZIONE PER I BENI CULTURALI EDIFICATI*, Alinea editrice, Firenze, 2010.
- [9] CANNAROZZO, R.; CUCCHIARINI, L.; MESCHIERI, W., *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna, 2012.
- [10] PIGATO C., *TOPOGRAFIA VOL.2*, Poseidonia scuola, 2017.
- [11] GALETTO R.; SPALLA A., *Lezioni di Topografia*, CUSL, Pavia, 1998.
- [12] POZZOLI S.; BONAZZA M.; VILLA W. S., *Revit 2019 per l'architettura. Guida completa per la progettazione BIM*. Tecniche nuove, 2019.
- [13] DI GIUDA G. M., *Introduzione al BIM Protocolli di modellazione e gestione informativa*, SOCIETÀ EDITRICE ESCULAPIO, Agosto 2019.
- [14] *Guida al BIM – La rivoluzione digitale dell'edilizia*, ACCA SOFTWARE, 20-03-2019.
- [15] RIZZARDA C. C.; GALLO G., *LA SFIDA DEL BIM. Un percorso di adozione per progettisti e imprese*, Tecniche nuove, Milano, 2017.
- [16] FERRARA A.; FELIGIONI E., *BIM E PROJECT MANAGEMENT. Guida pratica alla progettazione integrata*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2019.

- [17] GALLO P.; SIRSI P., *Informatica app 2*, MINERVA SCUOLA, Milano, 2016.
- [18] LINGUA A. M., *Cartografia numerica e GIS*, Politecnico di Torino, 2018.
- [19] Manuale d'uso *FARO SCENE* 2019.
- [20] Manuale d'uso *As-Built for Autodesk Revit* 2019.

Articoli

- [21] CHIABRANDO, F.; LINGUA, A. M.; MASCHIO, P.; RINAUDO, F.; SPANÒ, 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.
- [22] ALBERY, E.; LINGUA, A. M.; RINAUDO, F., *Tecniche e strumenti innovativi per il rilievo metrico dei beni culturali*, Atti di convegno: Giornata nazionale di studi del CIPA, 2000.
- [23] SCIANNA A.; CASTAGNETTI C.; MATRONE F., *IL BENCHMARK SIFET 2018: Restituzione di modelli 3D/BIM/HBIM da nuvole di punti prodotte da rilievi UAV o laser scanning terrestre*, Intervento presentato al convegno 22a Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 27-29 Novembre 2018.
- [24] CHIABRANDO F.; COLUCCI E.; LINGUA A. M.; MATRONE F.; NOARDO F.; SPANÒ A., *A European Interoperable Database (EID) to increase resilience of cultural heritage*, intervento presentato al convegno “Geoinformation for Disaster Management Conference”, Gi4DM 2018, Istanbul, 18 – 21 Marzo 2018.
- [25] DE RUVO V.; COLUCCI E.; LINGUA A. M.; MATRONE F.; SPANÒ A., *HBIM in un database GIS 3D semantico*, Intervento presentato al convegno ASITA 2019, Trieste, 12-14 Novembre 2019.
- [26] DE RUVO V.; COLUCCI E.; LINGUA A. M.; MATRONE F.; RIZZO G., *HBIM-GIS Integration: From IFC to CityGML Standard for Damaged Cultural Heritage in a Multiscale 3D GIS*, APPLIED SCIENCES, 2020.
- [27] ZHANG W., QI J., WAN P., WANG H., XIE D., WANG X., YAN G. *An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing*. 2016.

- [28] GUIDI, G.; REMONDINO, F.; RUSSO, M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in “Archeologia e Calcolatori”, n.22, 2011.
- [29] FECCHIO L., *I Sacri Monti, una realtà fragile*, Il giornale dell'ARCHITETTURA, 15 Ottobre 2019.
- [30] VIGLIANO G., *Urbanistica, architettura e tutela dei sacri monti*, 1° CONVEGNO INTERNAZIONALE SUI SACRI MONTI Varallo, 14 - 20 aprile 1980.
- [31] ACHILLE C.; TOMMASI C.; RECHICHI F.; FASSI F.; DE FILIPPIS E., *Towards an advanced conservation strategy: a structured database for sharing 3D documentation between expert users*, 27th CIPA International Symposium “Documenting the past for a better future” (Volume XLII-2/W15), Ávila, Spain, 1–5 Settembre 2019.
- [32] ENTE DI GESTIONE DEI SACRI MONTI, *La Nuova Gerusalemme, i dettami di San Carlo Borromeo e il Libro dei Misteri di Galeazzo Alessi*, Comunicato stampa.

Sitografia

- [33] http://atlvalesesiavercelli.it/riserva_naturale_speciale_del_sacro_monte_di_varallo_ita.php
- [34] <http://ingenio-web.it>
- [35] <http://biblus.acca.it>
- [36] <http://sacrimonti.net>
- [37] <http://sacromonte-varallo.com>
- [38] <http://geomaticaeconservazione.it>
- [39] <https://knowledge.autodesk.com>
- [40] <http://storiaefuturo.eu/si-presto-dire-patrimonio-culturale-problemi-prospettive-un-secolo-patrimonializzazione-della-cultura>
- [41] <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/index.jsp>
- [42] <https://support.microsoft.com>
- [43] <https://desktop.arcgis.com>
- [44] <https://www.unesco.beniculturali.it/>
- [45] <http://www.unesco.it/>

- [46] <https://www.progetti.interreg-italiasvizzera.eu/it>
- [47] <http://interreg-italiasvizzera.cheil.it>
- [48] <https://www.regione.piemonte.it>
- [49] <https://3dmetrica.it/>
- [50] <https://www.ibimi.it>

Tesi

- [51] 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.
- [52] SANNA S., *Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017.
- [53] 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, 2015.
- [54] 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, 2019.
- [55] URSINI A., *La metodologia BIM applicata ai beni culturali. Un caso specifico: il Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2018.
- [56] GIULIA TOTARO, *Attività di manutenzione e cura sui beni culturali architettonici: strategie e politiche di incentivazione*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2010.

Allegati

ALLEGATO A1 - MODELLO CONCETTUALE DEL DATABASE DI MAIN10ANCE.

ALLEGATO A2 - MODELLO LOGICO DEL DATABASE DI MAIN10ANCE.

ALLEGATO A3 – DATABASE DI MAIN10ANCE IN MICROSOFT ACCESS.