



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione e Città

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea dicembre 2021

Geomatica e HBIM per il patrimonio storico:

il Campanile della Chiesa di Santa Marta di Bernardo Vittone

Relatore:

Prof. Filiberto Chiabrando

Candidata:

Pellegrino Eleonora

Correlatore:

Dott. Lorenzo Teppati Lose'

*A Riccardo, alla mia famiglia e ai miei amici
che mi hanno accompagnato in questo percorso*

Sommario

La tesi vuole indagare le potenzialità del processo H-BIM (Historical/Heritage Building Information Modeling) e le potenzialità delle più avanzate tecnologie di rilievo metrico tridimensionale, sempre più diffusi nel campo della digitalizzazione e documentazione del patrimonio storico costruito.

In particolare, all'interno della ricerca verranno analizzate le tecniche di rilievo basate su tecnologia laser (mobile e fissa) integrati al rilievo fotogrammetrico da UAV (unmanned/uncrewed aereial system) denominati anche Droni, applicati al caso studio del Campanile di Vittone della Chiesa di Santa Marta nel territorio di Montanaro, in provincia di Torino.

La struttura della tesi è articolata sui seguenti aspetti: dopo una prima fase di documentazione storica e archivistica del complesso architettonico utile alla conoscenza delle forme geometriche e dei materiali impiegati per la sua realizzazione, segue una seconda fase di raccolta ed elaborazione dei dati di rilievo acquisiti per la generazione della nuvola di punti 3D utile alla documentazione del Campanile.

Nella terza fase di studio sono stati sperimentati metodi utili alla creazione del modello 3D basato su tecnologia BIM.

Partendo dalla nuvola di punti è stato realizzato un modello tridimensionale intelligente As-Built, costituito da elementi parametrizzati dai quale è possibile attraverso un'interrogazione ottenere dati e caratteristiche specifiche del bene culturale analizzato all'interno della tesi.

Essendo un campo di indagine sperimentale, date le complessità del campanile oggetto di studio, sono stati adottati più metodi di generazione del modello parametrico dei singoli componenti architettonici.

Abstract

The thesis aims to investigate the potential of the H-BIM (Historical / Heritage Building Information Modeling) process and the new 3D metric survey methodologies that are increasingly widespread in the field of digitization and documentation of built historical heritage.

In particular, the research analyzes the survey techniques based on laser technology (mobile and fixed) integrated with the photogrammetric survey from UAV (unmanned / uncrewed aerial system) also called Drones, applied to the case study of the Bell Tower of the Church of Santa Marta by Bernardo Vittone in the territory of Montanaro, in the province of Turin.

The structure of the thesis is divided into the following aspects: after a first phase of historical and archival documentation of the architectural complex useful for the knowledge of the geometric shapes and materials used for its realization, a second phase of collection and processing of the acquired survey data follows for the generation of the 3D point cloud useful for the documentation of the Campanile.

In the third phase of the study, methods useful for the creation of the 3D model based on BIM technology were tested.

Starting from the point cloud, an intelligent three-dimensional As-Built model was created, consisting of parameterized elements from which it is possible, through a query, to obtain specific data and characteristics of the cultural asset analyzed within the thesis.

Being a field of experimental investigation, given the complexities of the bell tower under study, several methods of generating the parametric model of the individual architectural components have been adopted.

Indice

Inquadramento territoriale	13
1.1. Il comune di Montanaro	13
1.1.1. Cenni storici	16
1.1.2. Montanaro fortificata.....	18
1.2. Opere di rilevanza architettonica in Montanaro.....	21
1.2.1. Castello di Montanaro	21
1.2.2. Parrocchiale di San Nicolao e dell'Assunta.....	22
1.2.3. La Cappella di San Rocco.....	23
1.2.4. Chiesa di San Grato	25
1.2.5. La Cappella di Sant'Anna	25
1.2.6. Chiesa di Santa Maria dell'Isola.....	26
1.2.7. Chiesa della Confraternita di Santa Marta	28
1.2.8. Santuario della Madonna di Loreto	30
1.2.9. Le Torri	31
Il campanile della Chiesa di Santa Marta	34
2.1. La riplasmazione del centro storico.....	34
2.2. La scelta dell'ubicazione.....	38
2.3. Fase di progettazione	40
2.4. Fase di costruzione	44
2.5. Sistemi costruttivi.....	47
2.6. Restauri successivi e conservazione del bene	49
I metodi e tecniche del rilievo 3D	50

3.1.	Inquadramento topografico - La topografia.....	51
3.1.1.	La Stazione totale	53
3.1.2.	Sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System).....	58
3.2.	Cenni di fotogrammetria.....	64
3.2.1.	Fotogrammetria analogica.....	64
3.2.2.	Fotogrammetria analitica.....	65
3.2.3.	Fotogrammetria digitale	65
3.2.4.	Classificazione delle camere per applicazioni fotogrammetriche	66
3.2.5.	Modalità di acquisizione.....	67
3.2.6.	Visione stereoscopica.....	70
3.2.7.	Le fasi del processo fotogrammetrico	71
3.2.8.	Equazioni di collinearità	74
3.2.9.	Calibrazione delle camere.....	75
3.3.	Approcci SfM (Structure from Motion).....	79
3.4.	Fasi principali dell'approccio SfM	80
3.5.	Prodotti	82
3.6.	Fotogrammetria UAV	84
3.6.1.	Caratteristiche geometriche delle immagini	89
3.7.	Tecniche Lidar.....	91
3.7.1.	Laser scanner terrestri	93
3.8.	Sistemi di mobile mapping terrestre	98
3.8.1.	Algoritmi SLAM.....	98
	Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile	102

4.1.	Acquisizioni ed elaborazioni	102
4.1.1.	Zeb Revo RT	107
	Dalla nuvola dei punti al modello HBIM.....	110
5.1.	BIM: building information modelling.....	110
5.1.1.	CAD e BIM: le differenze	111
5.1.2.	Le dimensioni del BIM	113
5.1.3.	Interoperabilità.....	116
5.1.4.	Benefici	117
5.1.5.	Limiti.....	119
5.1.6.	Componenti edilizi	120
5.2.	L'H-BIM	123
5.2.1.	Obiettivi H-BIM.....	123
5.2.2.	Le fasi	124
	Il campanile: modellazione digitale	129
6.1.	Importazione della nuvola di punti.....	129
6.2.	Creazione delle masse locali	131
6.3.	Murature irregolari	134
6.4.	Modellazione di cornici e decori	137
6.5.	Modellazione della guglia.....	140
6.6.	Creazione di famiglie di elementi decorativi	143
6.7.	Modellazione della scala interna.....	147
6.8.	Arricchimento del modello	149
6.9.	Plugin analizzati	153

6.9.1.	PointCab	153
6.9.2.	AS-BUILT for Revit – FARO.....	156
	Conclusioni	159
	Bibliografia.....	161
	Sitografia	167

Indice delle figure

Figura 1 - Inquadramento territoriale Montanaro	14
Figura 2 - Castello di Montanaro, cartolina 1953	21
Figura 3 - Parrocchiale di San Nicolao e dell'Assunta	23
Figura 4 - Chiesa di San grato	25
Figura 5 - Cappella S. Anna	26
Figura 6 - Chiesa di Santa Maria dell'Isola	26
Figura 7 - Chiesa della Confraternita di Santa Marta.....	28
Figura 8 - Piazza della Chiesa, cartolina del 1955	28
Figura 9 - Santuario della Madonna di Loreto	30
Figura 10 - Foto storica della Torre del Burcanino	33
Figura 11 - Torre del Burcanino oggi Fonte: Giovanni Cena (amiciabbazia.it) ..	33
Figura 12 - Vista prospettica della via Giacomo Matteotti, cartolina 1970.....	36
Figura 13 - Prima soluzione	41
Figura 14 - Seconda Soluzione	41
Figura 15 - Terza soluzione	42
Figura 16 - Soluzione definitiva.....	42
Figura 17 - Sezione, piante e prospetto, Campanile di Vittone.....	44
Figura 18 - Rappresentazione grafica: angolo zenitale, azimutale, distanza inclinata.	54
Figura 19 - Stazione totale: assi.....	55
Figura 20 – Esempio di Stazione totale Leica TS 13.....	56
Figura 21 - Tabella comparativa dei sistemi GNSS.....	59
Figura 22 - Schema metodo di posizionamento assoluto	61

Figura 23 - Schema metodo di posizionamento relativo	62
Figura 24 – Schema metodo di posizionamento differenziale: l’acquisizione delle coordinate di un punto viene effettuata da due ricevitori A e B.	63
Figura 25 - Zenith 35, GeoMax.....	63
Figura 26 - Schema presa normale, rielaborazione dell'immagine (Zanichelli,2012).....	68
Figura 27 - Schema assi obliqui, rielaborazione dell'immagine (Zanichelli,2012)	68
Figura 28 – Stereoscopia	70
Figura 29 – Stereoscopia	70
Figura 30 - Proiezione centrale, schema esemplificativo	71
Figura 31 - Modello teorico applicato alla fotogrammetria, immagine rielaborata	72
Figura 32 - Rappresentazione grafica dell'intersezione dei raggi proiettanti, immagine rielaborata	73
Figura 33 - Rappresentazione della distorsione, immagine rielaborata	75
Figura 34 - Effetto della distorsione radiale simmetrica	77
Figura 35 - Effetto della distorsione tangenziale.....	78
Figura 36 - Acquisizione di fotogrammi multipli in posizioni differenti.....	81
Figura 37 – Prodotti SfM, applicazione sul Campanile di Vittone.....	81
Figura 38 - Ortoproiezione,	82
Figura 39 - 3-axis Brushless Camera Gimbal	85
Figura 40 - Acquisizione fotogrammi	87
Figura 41 – Rappresentazione grafica del GSD	90

Figura 42 - Schema di acquisizione, Laser triangolatori - Rielaborazione immagine	94
Figura 43 - Lase scanner Triangolatore DOT DPI-8.....	94
Figura 44 - Schema di acquisizione laser distanzionmetrici, rielaborazione immagine	95
Figura 45 - Laser Scanner RIEGL VZ-400i a tempo di volo.....	96
Figura 46 - Laser Scanner FARO S 350 a differenza di fase.....	97
Figura 47 - Stima della posizione dei landmark utilizzando la posizione del sensore.....	99
Figura 48 - Stima della posizione del sensore utilizzando dei landmarks.....	99
Figura 49 - Stima contemporaneamente della posizione del sensore e dei landmarks	100
Figura 50 - Rete topografica	103
Figura 51 - Rilievo di dettaglio, collimazione dei punti esterni ed interni.....	104
Figura 52 – Output del processo fotogrammetrico: ortofoto e nuvola di punti densa.....	105
Figura 53 - Campagne di volo UAV	106
Figura 54 - Zeb Revo RT di GeoSlam.....	107
Figura 55 - Nuvola interna	108
Figura 56 – BIM.....	110
Figura 57 - Le dimensioni del BIM.....	113
Figura 58 - Interoperabilità.....	116
Figura 59 - Curva di MacLeamy	118
Figura 60 - Gerarchia degli elementi in Revit.....	121

Figura 61 - Esempio di oggetto intelligente	122
Figura 62 - Livello di accuratezza (LoA)	127
Figura 64 - Nuvola di punti esterna	130
Figura 64 - Nuvola di punti interna	130
Figura 65 - Inserimento della nuvola di punti a coordinate condivise.....	130
Figura 66 - Creazione della massa: ricalco in pianta della nuvola di punti Autodesk Revit 2022.....	132
Figura 67 - Unione dei piani e creazione della massa solida.....	133
Figura 68 - Visualizzazione dei piani costruiti	133
Figura 69 - Visualizzazione della massa in sovrapposizione alla nuvola di punti Autodesk Revit 2022.....	133
Figura 70 - Creazione dei volumi superiori con modello locale Autodesk Revit 2022	135
Figura 71 - Esempio di creazione di Nurbs in Rhino	138
Figura 72 - Realizzazione di una cornice con comando “unione” Autodesk Revit 2022	139
Figura 73 - Vista 3D Estrusione su percorso Base guglia Autodesk Revit 2022	140
Figura 74 - Profilo in sezione - Ricalco da nuvola di punti Base guglia Autodesk Revit 2022.....	140
Figura 75 - Creazione della guglia: vista 3D unione dei piani e realizzazione della massa concettuale Autodesk Revit 2022.....	141
Figura 76 - Creazione della guglia: vista 3D piani di riferimento Autodesk Revit 2022	141
Figura 77 - Vista 3D sovrapposizione del modello sulla nuvola di punti Autodesk Revit 2022.....	142

Figura 78 - Profilo di rivoluzione in vista sezione Autodesk Revit 2022	142
Figura 79 - Creazione della famiglia Pinnacolo Autodesk Revit 2022.....	144
Figura 80 - Visualizzazione della famiglia pinnacolo realizzata Autodesk Revit 2022	144
Figura 81 - Creazione della famiglia modiglione e inserimento dei parametri di spessore Autodesk Revit 2022	145
Figura 82 - Interrogazione del modiglione e visualizzazione delle proprietà Autodesk Revit 2022.....	146
Figura 83 - Scala campanile, documentazione del degrado	148
Figura 84 - Scala campanile, documentazione del degrado	148
Figura 85 - Creazione della scala personalizzata, vista in pianta e sezione Autodesk Revit 2022.....	148
Figura 86 - Inserimento di informazioni sul materiale nel Browser dei materiali Autodesk Revit 2022.....	149
Figura 87 - Inserimento di informazioni sulla tipologia di mattone utilizzato nella costruzione del campanile Autodesk Revit 2022	150
Figura 88 - Creazione di parametri di progetto Autodesk Revit 2022.....	150
Figura 89 - Creazione di parametri globali Autodesk Revit 2022	151
Figura 90 - Inserimento di parametri "immagine" Autodesk Revit 2022	152
Figura 91 - Creazione della vista con "Layout e sezione" PointCab.....	154
Figura 92 - Vettorizzazione con "Trova Linee" PointCab	155
Figura 93 - Impostazione della soglia di selezione con "Vettorizzatore" PointCab	155
Figura 94 - Analisi della superficie.....	157

Inquadramento territoriale

1.1. Il comune di Montanaro

Montanaro è un piccolo comune situato nella parte nordorientale della Provincia di Torino, in Piemonte, tra la valle dell'Orco e le valli di Lanzo.

Sito a 29 chilometri di distanza da Torino su un'area pianeggiante a 209 metri di altezza sul livello del mare, ad est del tratto terminale del torrente Orco. Confina a nord con il comune di Foglizzo e di Caluso, a ovest con il comune di San Benigno Canavese e a est e sud con la città di Chivasso.

Inquadramento territoriale - Il comune di Montanaro

La sua superficie si estende per 20,90 chilometri quadrati, con una popolazione di 5142¹ abitanti distribuita lungo i lati della strada che collega Chivasso a Foglizzo.

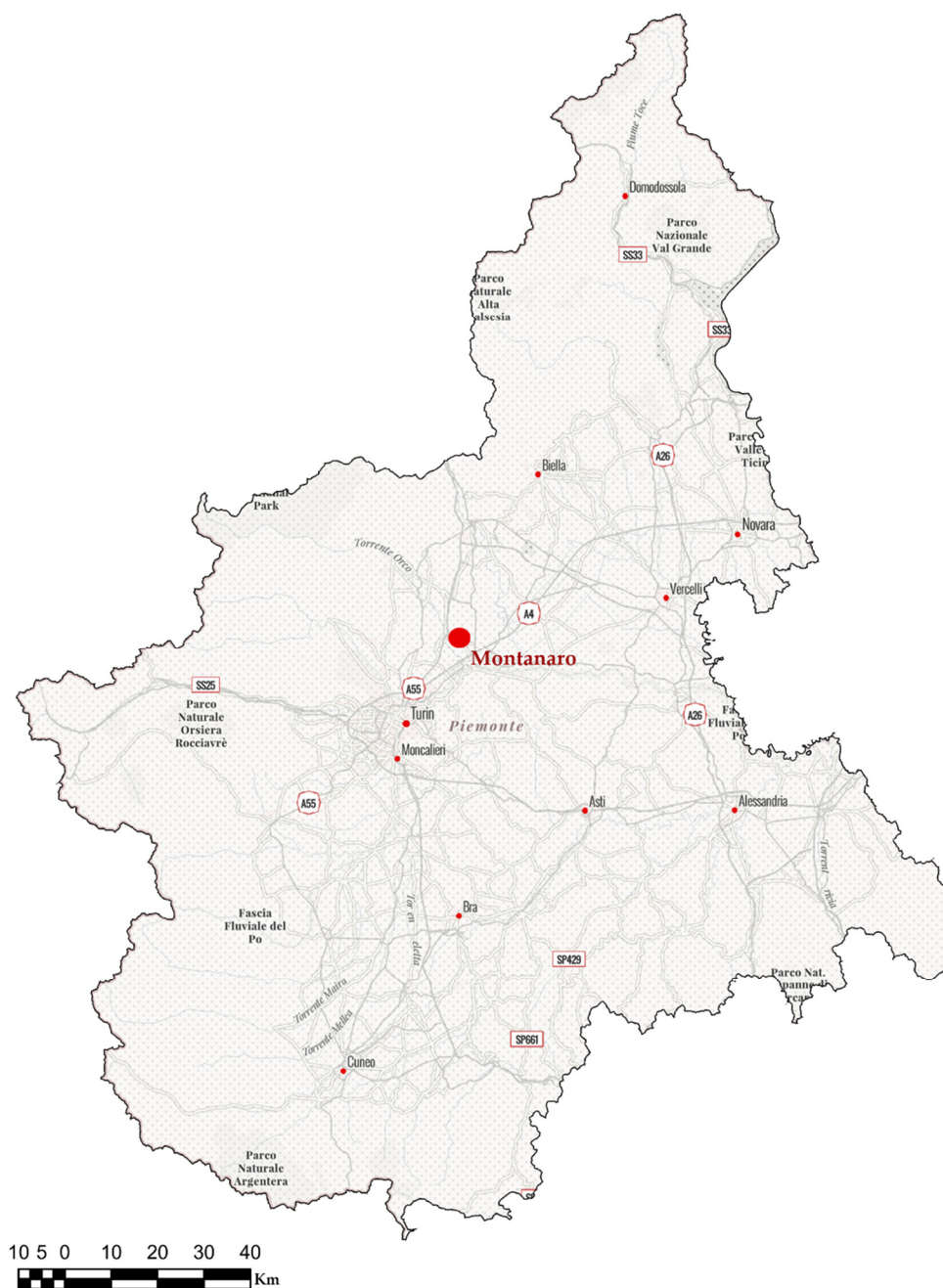


Figura 1 - Inquadramento territoriale Montanaro

¹Dato riferito alla data 01/01/2021, Sito ufficiale del Comune di Montanaro.

Stato sede dei 'montanei' ossia di pastori provenienti dalla Valle dell'Orco, Montanaro è uno dei Comuni più antichi del Canavese. Anticamente si chiamava *Villalunga* poiché il suo abitato era distribuito su un'unica linea lunga di 1200 metri. Molti studi sembrano indicare che le antiche abitazioni iniziassero dalla chiesa della Madonna dell'Isola per continuare fino ai boschi dell'Orco, alla chiesa di S. Solutore, le cui tracce di quest'ultima si persero nei secoli.

Il borgo antico subì poi frequenti inondazioni e guerre e, probabilmente non essendo più disposto nella sua conformazione rettilinea andò incontro al cambio di toponimo in Montanaro. Secondo il Dondana² l'origine del nome è da attribuirsi all'altopiano in cui era sito in una folta e nera boscaglia, la 'Silva Fullicia' da cui deriverebbe il termine di *Montenero* cambiato più tardi per facilità di pronuncia in Montanaro.

Le prime testimonianze storiche risalgono al 997 d.C., periodo nel quale apparteneva all'episcopato di Vercelli e all'abbazia di Fruttuaria, in seguito fu saccheggiato e la proprietà passò nelle mani dei marchesi del Monferrato e nel 1431 d.C. al Ducato di Savoia.

² Dondana, A., (1884). Memorie storiche di Montanaro, Tipografia Eredi Botta, p.6.

1.1.1. Cenni storici

Durante la dominazione dei Franchi, dal 773 d.C. al 888 d.C., in Italia si diffuse una nuova forma di governo denominata come Feudalesimo. I montaneresi verso la fine del XI secolo, non sopportando più il regime politico, per sottrarsi al potere dei nobili che si stava manifestando sempre più imponente sul territorio chiesero la protezione del Monastero di S. Benigno³.

Le origini dell'Abbazia di San Benigno risalgono al 1003 d.C., fondata da S. Willelmo abate, nato da una delle famiglie più potenti del canavese ai tempi dell'imperatore Ottone il Grande. In giovane età si trasferì in Francia dove divenne abate e tornato in Italia ottenne il potere di erigere il nuovo Monastero in un podere paterno detto Fruttuaria.

I monaci arrivarono quindi a possedere diverse terre in vicinanza del fiume Orco, in seguito a molte donazioni da parte di signori, chierici e gli stessi montaneresi. Il monastero estese con il passare del tempo il suo dominio sul territorio Canavesano e il 16 agosto del 1255 d.C. grazie alla vendita del Monastero da parte della famiglia del conte d'Orio all'Abate Oberto, gli abati divennero i soli proprietari di tutte le terre sul territorio di Montanaro, tranne alcune terre possedute dall'Ospedale di Vercelli che poi saranno scambiate nel 1380 d.C., con altre che il Monastero possedeva.

Con il passare del tempo il potere del Monastero diminuì e solo quattro terre rimasero sotto la sua influenza: quella di San Benigno, Feletto, Lombardore e Montanaro.

Sotto il dominio del Monastero, le condizioni civili della popolazione montanerese migliorarono eguagliando i diritti, detenendo il controllo

³ Dondana, A., (1884). Memorie storiche di Montanaro, Tipografia Eredi Botta.

dell'amministrazione interna tramite Statuti Locali e sotto la loro protezione e guida ci fu un periodo di pace e tranquillità.

Durante il XIV secolo il periodo di tranquillità si trasformò in un periodo sanguinoso di guerre che vide coinvolte le fazioni dei Guelfi e dei Ghibellini, e nel 1362 il Monferrato colse l'occasione per saccheggiare le terre canavesane. Fortuna volle che gran parte del territorio di Chivasso necessitasse di acqua, portando alla stesura di una serie di accordi tra Monferrato e il monastero riguardo la concessione di un canale irrigatorio dall'Orco ponendo quindi fine alle rapine e alle violenze.

Successivamente la popolazione contadina fu protagonista di alcune rivolte, durate quasi mezzo secolo, e che portarono l'assalto alle campagne e ai castelli dei loro feudatari. Gli abati, non disponendo di potere militare e non essendo quindi capaci a difendere le proprie terre chiesero l'aiuto del Duca di Savoia, Amedeo VIII.

Tra il XV -XVI secolo con l'aumentare della popolazione il territorio espanse i propri confini al di fuori delle cinte murarie e il 30 aprile del 1527 d.C. il Papa Clemente VII concesse agli abati di Fruttuaria di coniare delle proprie monete all'interno di un edificio delimitato da una torretta detta Torre della Zecca, costruita dal Cardinale Ferrero.

Nei secoli successivi il potere dei Savoia prevalse fino a quando con la Bolla del 3 gennaio del 1741 d.C., il papa Benedetto XIV, riservando il controllo religioso alla chiesa, concesse i totali diritti a Carlo Emanuele III e i suoi successori delle quattro terre abbaziali.

1.1.2. Montanaro fortificata

Le prime testimonianze che fanno pensare a Montanaro come territorio fortificato si possono trovare all'interno del documento del 9 maggio 1398 d.C. nel quale si concedeva al Marchese Teodoro di Monferrato la possibilità di realizzare per le terre di Montanaro il canale irrigatorio che oggi prende il nome di bealera di Chivasso. Nel caso la bealera avesse portato danni alle fortificazioni sarebbe stato necessario cambiare l'alveo sulla base delle indicazioni dell'Abate e del castellano di Chivasso. Queste indicazioni ci fanno pensare ad un paese che nella fine del XIV secolo era già fortificato.

All'interno delle "Memorie storiche di Montanaro" viene descritta la configurazione urbana di Montanaro nel medioevo. Le mura dovevano avere forma quadrata, sull'angolo sud-est della piazza maggiore sorgeva la torre detta del Beccuto. Verso est il muro arrivava in prossimità della chiesa, dove vi era la porta di san Nicolao poi continuando per un tratto rettilineo finiva in direzione nord nella torre Perolla sede della Credenza⁴ fino al 1644 d.C., anno in cui venne distrutto per l'edificazione della nuova chiesa. A conclusione del tratto oltre la torre Perolla, vi era l'antico castello di pianta quadrata circondato ai lati da quattro torri con merli e feritoie.

Quattro erano le porte all'interno del paese in corrispondenza della quattro vie principali: quella del Beccuto, quella di Borcaino oggi chiamata dei Portici, quella della Piazza o di Malgrato e quella delle Torri.

A quell'epoca vi era presente un solo forno pubblico e un macello in corrispondenza della porta di Borcaino.

⁴ L'amministrazione governativa e civile di Montanaro avveniva all'interno della Credenza, un consiglio composto da due consoli o sindaci e dodici consiglieri che agivano per il bene pubblico sotto l'influenza degli abati.

Di chiese ve ne erano tre: Madonna dell'isola, la cappella di san Nicolao e quella di san Gervasio. A completare l'immagine dell'antico borgo medievale vi erano un centinaio di piccole case che erano distribuite in modo quasi casuale, a due o tre piani, con piccole finestre. Le vie erano strette, tortuose e sterrate⁵.

I primi documenti dell'assetto geografico e urbano risalgono alla cartografia Sabauda, di particolare interesse la Carta Generale de Stati di Sua Altezza Reale del 1680 e la Carta corografica degli Stati di S.M. il Re di Sardegna del 1772 d.C..

Nei documenti, montanaro è individuato come un borgo non più fortificato situato sulla via tra Chivasso e Ivrea verso il torrente Orco.

In un secondo disegno conservato presso l'archivio storico di montanaro si comprende maggiormente l'assetto viario articolato da quattro vie che collegavano Montanaro al resto degli Stati Sabaudi.

In particolare, uno dei tracciati principali era quello da Ivrea verso Montanaro, passando per Rodallo e arrivando davanti ad una delle testimonianze più antiche ad opera dei monaci dell'Abbazia di Fruttuaria: la Chiesa di Santa Maria dell'isola, costruita nel 1006 d.C..

Una seconda via di collegamento era destinata a coloro che arrivavano da San Giorgio e Foglizzo giungendo nella parte nord del paese; questi viaggiatori si trovavano a scorgere un paesaggio urbano completamente differente, caratterizzato da mulini e aree verdi.

Due ulteriori strade erano a disposizione per chi arrivava da sud, una prima passando per Chivasso, imboccando la Roggia Reiola e la Roggia di Chivasso e attraversando quindi le Allee, viali alberati posti tra le due rogge, che conducevano al santuario della Madonna di Loreto, attribuito a Camillo Guarino Guarini.

⁵ Dondana, A., (1884). Memorie storiche di Montanaro, Tipografia Eredi Botta.

Una seconda passando da San Benigno, prendendo una strada che portava sulle rive dell'Orco e proseguendo si diramava in due strade che portavano al paese: una, detta 'via vecchia' con la quale si raggiungeva la piazza centrale. L'altra ancora oggi conosciuta come strada del porto, incontrando prima la campagna e giungendo poi ancor accanto al santuario della Madonna di Loreto.

Dall'ingresso della porta medievale partiva la Contrada principale, adornata da due file di case di due o tre piani caratterizzate quasi tutte dalla presenza di un portico e in posizione centrale prospetticamente si distingueva il Campanile, dai colori chiari in contrasto con quelli vivaci delle case e, in prossimità di esso, sempre sulla piazza centrale la chiesa di San Giovanni Decollato e di Santa Marta, in sostituzione del trecentesco Oratorio della Confraternita dei Laici Disciplinati⁶.

⁶ Battaglio, M. (2000). L'ultimo di Vittone, il Campanile di Montanaro nuovi rilievi e fonti d'archivio, Litoart.

1.2. Opere di rilevanza architettonica in Montanaro

1.2.1. Castello di Montanaro

Le origini del castello risalgono ai primi anni del XIII secolo, edificato come sistema di difesa divenne proprietà dell'Abbazia di Fruttuaria il 16 agosto 1255 d.C..

Il castello aveva forma quadrata ed era circondato da quattro torri con merli e feritoie.

Nel 1533 d.C., il Cardinale abate Bonifacio Ferrero riedificò il castello ormai in stato di rovina, con un progetto che prevedeva l'ampliamento e la riplasmazione dell'edificio mediante l'introduzione di nuove aree destinate alle carceri e alla sede della zecca.

Rilevanti successive modifiche avvennero per ordine del principe Tommaso di Savoia nel 1642 d.C. che fece costruire a Carlo Morello a completamento del



Figura 2 - Castello di Montanaro, cartolina 1953

castello un giardino e le attuali mura che lo delimitano, demolendo l'antica cappella di San Gervasio e il cimitero adiacente.

Il castello presentava una pianta a U che si sviluppava intorno al cortile racchiuso da mura e da fabbricati all'interno dei quali si inserisce la porta col ponte levatoio. Due torri semicircolari difensive ai lati delle mura, una ancora oggi rimasta a noi indenne.

L'Abbazia di Fruttuaria rimane proprietaria del castello fino al 1801 d.C., quando Giuseppe Frola l'acquista e tra il 1885-1888 d.C. avvia un intervento in stile neogotico trasformandolo in residenza privata allontanandosi da quella che era la sua conformazione originale.

1.2.2. Parrocchiale di San Nicolao e dell'Assunta

L'antica chiesa di San Nicolao nel 1641 d.C. viene distrutta da un incendio che colpì tutto il territorio di Montanaro.

Nel 1644 d.C. viene richiesta la ricostruzione a opera dell'architetto ducale Carlo Morello di Pavia terminata nel 1649 d.C. viene rinominata chiesa di Santa Maria dell'Assunta.

Con l'aumento della popolazione viene richiesto un successivo ampliamento della struttura e tra il 1752 d.C. e il 1756 d.C. verrà approvata la pianta che è quella odierna di Bernardo Vittone completata nel 1765 d.C..

Sorta accanto alla confraternita di Santa Marta, sede battesimale, appare per la prima volta nel 1700 d.C. la presenza di un monumentale organo.

L'interno è caratterizzato da una pianta a croce latina ad un'unica grande navata coperta da volte a botte, nella quale si inseriscono cappelle piccole e grosse, nelle più ampie vi sono il transetto, il presbiterio e il coro circolare. Presenta nove

Inquadramento territoriale - Opere di rilevanza architettonica in Montanaro

altari, di maggior rilievo quello maggiore ricco di marmi variopinti e quello dedicato a S. Giuseppe.

La facciata semplice e sobria nelle decorazioni è suddivisa in due ordini raccordati da volute.



Figura 3 - Parrocchiale di San Nicolao e dell'Assunta

Fonte: <https://www.joyphotographers.com/cristina-valerio-castello-di-masino/>

1.2.3. La Cappella di San Rocco

Verso il 1500 d.C. con l'accrescimento della popolazione, furono tracciate nuove vie che partivano dal centro di Montanaro e arrivavano oltre le cinte murarie, in corrispondenza di questi nuovi tracciati sarebbero sorte delle chiese che avrebbero dato il nome a questi nuovi borghi. Nascono così la chiesa di San Grato, di Loreto, della Consolata e di San Rocco.

Eretta dal Comune nel 1603 d.C., in un documento del 1618 d.C. vi si trovano le spese affrontate per la costruzione del contro-altare, restaurata successivamente nel 1745 d.C. dal Comune e nel 1764 d.C. venne costruita la sacrestia dal

Inquadramento territoriale - Opere di rilevanza architettonica in Montanaro

Cardinale delle Lanze, nel 1796 d.C. venne in seguito costruito il campanile e riqualificata la piazza antistante, parte del progetto complessivo.

Dalle forme semplici e sobrie, la facciata è decorata da due affreschi inseriti all'interno di nicchie poste al di sopra delle finestre, il primo a sinistra rappresentante S. Rocco con il suo cane e sulla destra, l'Arcangelo Michele.

Questa tipologia di cappella aveva due piccole finestre alte poco più di un metro da terra progettate per far sì che i contadini o i pastori tornati dopo la giornata di lavoro potessero volgere una preghiera al Santo Protettore.

All'interno era custodita la grande pala dell'altare, sulla quale erano raffigurati la Vergine Maria con il Bambino Gesù, S. Rocco e S. Sebastiano.

1.2.4. Chiesa di San Grato

Edificata nel XVI secolo, originalmente un piccolo oratorio, formato da un unico altare, mancava di sacrestia e delle due cappelle laterali.

Verso la metà del 1700 d.C. fu ampliata con l'inserimento di due altari laterali distinti dal corpo della chiesa, all'interno di due cappelle voltate a cupola, affrescate come anche il soffitto della navata da artisti locali.



Figura 4 - Chiesa di San grato

Fonte: <https://www.comune.montanaro.to.it/it-it/vivere-il-comune/cosa-vedere/chiesa-di-san-grato-39903-1-fa5d2c7ac4b7b6f3086d7317d6648673>

Nel 1742 d.C. i direttori a capo dell'ampliamento, Ferreo e Bricha chiesero al comune l'edificazione di un altare su cui porre l'effigie della B. V. di Caravaggio, in seguito nel dicembre del 1743 d.C. furono collocati l'altare e la Madonna scolpita da Paolino Rampone di Feletto.

1.2.5. La Cappella di Sant'Anna

Eretta verso la metà del XVII secolo per opera del Comune, si diversifica dalle altre opere architettoniche di montanaro per la presenza di rivestimento di facciata in cotto a vista e l'utilizzo della cupola che si è riscontrato solo nella Chiesa di Loreto.

Inquadramento territoriale - Opere di rilevanza architettonica in Montanaro

Fu costruita come cappella privata dei conti Frola, dedicata a Santa Maria e Sant'Anna.



Figura 5 - Cappella S. Anna

Fonte: <http://www.amiciabbazia.it/cappella-di-santanna/>

1.2.6. Chiesa di Santa Maria dell'Isola

La chiesa di Santa Maria dell'Isola rappresenta una delle più antiche opere architettoniche di Montanaro, ad opera dei monaci dell'Abbazia di Fruttuaria la sua costruzione si attribuisce dopo il 1006 d.C. circa. Anticamente presentava



Figura 6 - Chiesa di Santa Maria dell'Isola

Fonte: <http://www.amiciabbazia.it/pieve-di-s-maria-disola/>

una pianta rettangolare che terminava in un'abside circolare, mostrava all'interno solo tre altari, uno centrale maggiore e due laterali, dedicati uno allo Spirito Santo e l'altro Sant'Agata.

Intorno al 1600 d.C., con l'aumento demografico la chiesa subì delle trasformazioni che ne permisero l'ingrandimento, comportando però l'eliminazione del complesso romanico sede della fonte battesimale che era stato luogo di battesimo per tutti i paesi limitrofi a Montanaro.

Verso la metà del XVII secolo si ottenne dal Principe Tommaso il permesso di poter abbattere l'antica chiesa per riedificarne una nuova servendosi dei materiali antichi per la nuova costruzione.

Il 16 giugno del 1644 d.C., venne commissionato Morello, ingegner del Duca nel ridisegno della fabbrica e arrivato a Montanaro iniziò a tracciare le fondamenta ed abbattere parte del vecchio muro della chiesa insieme alla vecchia torre Perrolla. L'ampliamento fu terminato nel 1649 d.C. e solo nel 1650 d.C. si cominciarono a celebrare le funzioni.

Della chiesa rimase la torre campanaria in stile romanico disponendo a fianco la nuova facciata scandita da quattro lesene che si estendono in altezza per due livelli divisi da cornicioni.

Al piano terra vi sono due piccole finestrelle rettangolari, una per ogni campata e al centro sopra il portale d'ingresso, una finestra a serliana con arco a tutto sesto.

A conclusione della fabbrica un timpano con affrescata una raffigurazione della Vergine Maria Assunta in Cielo.

La pianta ampliata si presenta longitudinale con abside semicircolare e nove altari di cui otto adornati da eleganti sculture in legno, ad una navata centrale voltata a botte e in corrispondenza del presbiterio voltato a crociera.

1.2.7. Chiesa della Confraternita di Santa Marta

Fu costruita su progetto dell'architetto Bernardo Vittone negli anni 1744-48 d.C. in sostituzione del precedente oratorio trecentesco dei laici disciplinati.

Nel 1765 d.C. durante la ricostruzione e l'ampliamento della Chiesa di San Nicolao da parte dell'architetto Carlo Morello fu necessario abbassare il livello della piazza, per questo motivo si poteva accedere alla Chiesa di San Marta solo per mezzo di una scala.



*Figura 7 - Chiesa della Confraternita di Santa Marta
Fonte: <https://www.univoca.org/30-settembre-amici-di-fruttuariamontanaro-in-passeggiata-virtuale/>*



Figura 8 - Piazza della Chiesa, cartolina del 1955

Nel 1766 d.C. per risolvere questo problema il comune decise di consultare l'Ingegnere Vittone che nel 1769 d.C. costruisce la nuova facciata attuale comprensiva del 'Perron' dal gusto barocco: una scala al coperto, costituita da due corpi laterali più bassi architravati e uno centrale arcuato che permetteva di

Inquadramento territoriale - Opere di rilevanza architettonica in Montanaro

arrivare alla porta dalla piazzetta. L'interno della chiesa è costituito da una piccola navata e un unico altare su cui è posta la pala della decapitazione nel carcere di San Giovanni Battista.

Al di sopra del primo timpano, sulla facciata esterna, delle finestre ogivali irradiano l'interno creando interessanti giochi di luce.

1.2.8. Santuario della Madonna di Loreto

La costruzione viene attribuita all'architetto Camillo Guarino Guarini edificato tra il 1680 d.C. e il 1684 d.C., architetto della corte di Carlo Emanuele II Duca di Savoia.

Il 10 dicembre del 1680 d.C. il vicario Michelangelo Blancardi benedì il sito dove sarebbe sorta la chiesa e nel 1681 d.C. fu posta la prima pietra.

La costruzione del campanile avvenne soltanto nel 1757 d.C. per opera di Bernardo Vittone.

L'impianto geometrico è la sovrapposizione di due figure irregolari un ottagono e un esagono inscritto ad una pianta a croce greca.

All'interno la fabbrica presenta tre altari ricchi di colonne, statue e sculture in legno.



Figura 9 - Santuario della Madonna di Loreto

Fonte: <https://www.giornalelavoce.it/montanaro-un-po-di-storia-e-di-tradizione-a-pochi-chilometri-da-torino-426801>

1.2.9. Le Torri

Diversi studiosi documentano nei propri scritti Montanaro come borgo fortificato dotato di un numero rilevante di torri difensive risalenti al XIV secolo.

Nelle Passeggiate del Canavese(1869), Bertolotti descrive Montanaro come terra fortificata [...] *“et ha torrioni fora de le mura che battono dreto alle mura e che la rocha di questa terra è assai più forte che la lunga non dimostrava”*.

E ancora Dondana in Memoria storiche di Montanaro (1884) dice: *“Sull’angolo est della pizza maggiore sorgeva la torre detta del Beccuto [...] Di qui, e volto a levante, correva il muro fin presso la chiesa [...] e finiva a settentrione di questa nella torre Perolla [...] Di qui pigliava il muro della Corseria, via via abbassandosi sino alla torre di Urida [...] e di qui, continuando nella medesima direzione, giungevano alla torre del Rivellino sull’angolo sud-ovest”*.

1.2.9.1. Torre Perrolla

Sita in prossimità del castello era sede della Credenza, un terribile incendio nel 1641 d.C. divampò in tutto il territorio montanerese bruciando la torre e con lei l’archivio con i relativi documenti di nascita, morte e matrimonio, portando alla perdita di quasi tutte le testimonianze scritte della storia del paese fino a quel momento ad eccezione di quelle conservati in altre sedi.

Oggi, ci rimangono le testimonianze di alcune di queste antiche architetture, tra cui la Torre della Zecca e del Burcanino.

1.2.9.2. Torre della zecca

Montanaro nel 1525 d.C. divenne sede della zecca degli abati di S. Benigno di Fruttuaria.

Il Papa Clemente VII concesse all'abate Bonifacio Ferrero di coniare delle proprie monete all'interno di un edificio delimitato da una torretta detta Torre della Zecca.

1.2.9.3. Torre del Burcanino

Situato in vicinanza delle aree fortificate in via Taraglio, la torre ha una stratificazione architettonica che risale ai XIV-XV-XVI-XVII secoli. Dell'architettura trecentesca rimane la finestra ogivale contornata da paramenti in cotto.

Inquadramento territoriale - Opere di rilevanza architettonica in Montanaro



Figura 11 - Torre del Burcanino oggi
Fonte: Giovanni Cena (amiciabbazia.it)



Figura 10 - Foto storica della Torre del Burcanino
Fonte: Giovanni Cena (amiciabbazia.it)

Il campanile della Chiesa di Santa Marta

2.1. La riplasmazione del centro storico

Montanaro piccolo centro ai margini del canavese, assumerà nel corso dei secoli una rilevanza tale da diventare un interessante esempio di centro storico caratterizzato dalla costruzione di edifici di carattere religioso e civile ad opera di grandi architetti barocchi e tardo-barocchi del Piemonte.

Per comprendere il motivo di una concentrazione di architetti come Guarino Guarini, Carlo Morelli, Bernardo Vittone e Mario Ludovico Quarini, bisogna sapere che dal XI secolo il territorio era controllato e governato tramite Statuti Speciali, dall'Abbazia di S. Benigno.

I primi documenti riguardanti l'abbazia e Montanaro sono datati nell'anno 1111 d.C. da un "Istrumento di Investitura"⁷ nel quale venivano distribuite dall'abate Almeno tramite rapporto feudale le terre ai nobili.

Questo antico rapporto si consoliderà nel tempo portando al progressivo sviluppo del territorio, e l'abbazia assumerà sempre di più una posizione centrale

⁷ Nel diritto medievale italiano l'Istrumento di Investitura era uno strumento pubblico con forza esecutiva che prevedeva la concessione di un beneficio feudale da parte di un signore ad un vassallo.

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - La riplasmazione del centro storico

con la pubblicazione degli statuti locali di montanaro e l'acquisto del Castello da parte dei monaci di S. Benigno nel 1255 d.C..

Nei secoli successivi sotto la protezione del ducato di Savoia che possedeva tutti i diritti ad eccezione di quello religioso, vi fu una grande riqualificazione dell'intero territorio montanerese adeguandolo al nuovo gusto settecentesco.

In particolare, nel 1749 d.C. quando il Cardinale della Lanze divenne Abate Commendatario dell'Abbazia e durante la sua carica pose attenzione all'arte e alla cultura.

Nell'estate del 1767 d.C., Bernardo Vittone chiamato a risolvere delle problematiche sulle acque della Bealera di Chivasso, passando per le stradi centrali di Montanaro con i sindaci di quel tempo Bricca e Clara nota il grave stato di rovina della vecchia torre ed esprime la sua opinione in una relazione scritta, conservata oggi nell'Archivio storico del Comune, nella quale descrive la sua posizione contraria alla riparazione ma favorevole per un'ipotesi di riedificazione ex novo.

Vittone propose di posizionare il nuovo campanile nella piazza centrale dove era sita la Confraternita di Santa Marta e, di affiancare ad esso un nuovo fabbricato di necessità pubblica che avesse fatto anche da archivio personale delle proprie scritture.

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - La riplasmazione del centro storico

Nella nuova configurazione di Montanaro, Vittone lasciò intatte alcune preesistenze medievali come le torri, l'impianto stradale e i portici della via contrada, rivolgendo l'attenzione sulla creazione di una via prospettica sulla quale avrebbe fatto sfondo il maestoso campanile.

Il nucleo del borgo era rappresentato dalla piazza che avrebbe ospitato il campanile e che già fortemente modificata nei secoli era sita la chiesa di S. Nicolao, che nel 1758 d.C. fu ampliata su progetto di Vittone con alcune decorazioni interne di Quarini.



*Figura 12 - Vista prospettica della via
Giacomo Matteotti, cartolina 1970*

A lato della chiesa sorgeva un'ulteriore chiesa: quella di S. Marta modificata nel corso del XVIII dal Vittone con l'inserimento del Perron di gusto barocco.

All'interno di questo contesto storico, Vittone progetta il campanile e una nuova Casa della comunità, un unico grande complesso, con l'intento di uniformare l'area integrando un edificio di carattere religioso con uno di carattere pubblico.

La creazione di questa via richiese l'acquisizione di alcune abitazioni che furono poi demolite e in parte recuperati i materiali di costruzione per reimpiegarli nelle nuove fabbriche. È noto, infatti, in numerosi documenti come il progetto doveva essere il meno dispendioso possibile e la pratica del reimpiego poteva facilitarne il risparmio in termini di materiali e spostamenti.

L'intero progetto è pensato per essere economico e funzionale e sulla base di queste esigenze Vittone per la costruzione del campanile decide di inglobare parte della casa comunale, in modo che una porzione di un edificio sia fruibile per entrambi.

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - La riplasmazione del centro storico

Le piante degli edifici furono pensate come un unico organismo, l'accesso ai piani superiore della casa della comunità era possibile solo entrando dall'ingresso della torre, salendo lungo la scala elicoidale.

2.2. La scelta dell'ubicazione

Terminato nelle sue principali strutture l'ampliamento della chiesa vice-parrocchiale di S. Nicolao e l'avvenuta consacrazione da parte del cardinale delle Lanze nel 9 maggio del 1765 d.C. Vittone iniziò a pensare al collocamento del campanile e della nuova casa della comunità.

Nel suo "Parere" Vittone descrive le sei proposte per il collocamento del campanile e della casa, elencandone le osservazioni che lo avrebbero portato alla giusta soluzione per l'ubicazione.

La prima proposta fu quella di costruire il campanile: *"[...] nell'angolo del Cappellone della chiesa verso mezzogiorno, e Sacrestia della medesima verso ponente"*⁸.

In questa prima soluzione Vittone si mostra preoccupato al fatto che il volume del campanile avrebbe fatto ombra sulla cupola della chiesa impedendo il disgelarsi delle nevi durante la stagione invernale.

La seconda proposta fu quella di inserirlo: *"[...] nella parte opposta al sito suddetto, et a mezzo giorno della strada, che ricorre tra il suddetto sito e cimiterio pubblico"*⁹ ma la scelta di questa ubicazione non sarebbe risultata decorosa per il campanile e la casa essendo davanti alla vista di un cimitero, inoltre il terreno aveva problemi di umidità che avrebbe comportato problemi ulteriori per le fondamenta.

Un'ulteriore proposta fu quella di situarlo tra la chiesa di San Nicolao e di S. Marta.

Anche questa scelta fu scartata dal Vittone perché il campanile non avrebbe avuto facciate esposte verso la piazza e quindi poco visibile e nascosta dalle altre

⁸ op. cit.: Parere di Bernardo Vittone, 8 settembre 1767.

⁹ ibidem

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - La scelta dell'ubicazione

architetture. Inoltre, avrebbe comportato la chiusura di due delle finestre delle chiese.

Un'altra soluzione presa in considerazione fu quella di situarlo in conclusione della contrada principale nell'area in prossimità della Porta di Borcanino, ma fu esclusa nuovamente per la sua lontananza dalla chiesa e dal pensiero che la sua costruzione avrebbe comportato la demolizione dell'antico forno e della "casa del pubblico macello".

Vittone pensò anche di posizionare il nuovo campanile in corrispondenza di quello vecchio ma ci ripensò essendo questo lontano dal centro e in una posizione scomoda che non sarebbe stata utile ai fini della casa comunale che avrebbe in tal caso essere costruita dall'altra parte.

L'ultima proposta fu quella definitiva collocando la torre tra la chiesa di S. Marta e la rampa del castello in corrispondenza della esistente e vecchia casa della comunità.

2.3.Fase di progettazione

Prima di arrivare al campanile così come lo si conosce oggi, Vittone produrrà quattro versioni.; nella prima disegnerà un complesso edilizio composto da tre maniche distribuite intorno ad un cortile confinante alla Chiesa, la torre invece confinava con l'oratorio e prendeva il lato sud del cortile.

L'accesso alla casa comunale avveniva tramite l'utilizzo della scala all'interno del campanile con la quale si poteva accedere agli ambienti interni e di archivio, alla sale delle congregazioni e al ripostiglio, una sala di piccole dimensioni di utilizzo comune.

Al piano superiore vi erano distribuite le aule scolastiche e sempre attraverso il campanile si poteva accedere al piccolo cortile che fungeva da disimpegno, adiacente alla camera delle congregazioni (Figura 13).

In un secondo disegno del dicembre 1768 d.C., oltre alla costruzione del campanile e del nuovo fabbricato la casa della Comunità, ipotizza un ampliamento che si estendeva verso la casa parrocchiale modificando e alleggerendo con la creazione di un nuovo accesso con scala la struttura e l'inserimento di una terrazza al primo piano (Figura 14).

In una terza elaborazione l'architetto rinunciò alla riqualificazione della casa parrocchiale poiché non ne avrebbe giovato ai fini della costruzione delle nuove fabbriche che, nella nuova configurazione comprendente la casa parrocchiale sarebbe rimasta invariata.

Si concentrò quindi sul progetto della casa comunale e del campanile proponendo un sistema planimetrico a L per la casa della comunità spostando nell'angolo ovest il campanile, occupando parte della piazza verso sud, posizione che lo avrebbe messo maggiormente in luce dalla via della contrada principale (Figura 15).

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di progettazione

Il progetto definitivo sarà consegnato nell'agosto del 1769 d.C., due anni dopo, nel disegno Vittone mantiene la posizione planimetrica della precedente versione ma riduce le dimensioni della sala di circa la metà della lunghezza spostando di conseguenza la torre confinante arretrandola in modo adiacente alla sala.

Il campanile assume ancora di più la funzione centrale di accesso e vano di disimpegno ai diversi locali evitando di passare tra un'aula per arrivarne ad un'altra creando un complesso unico e funzionale (Figura 16).

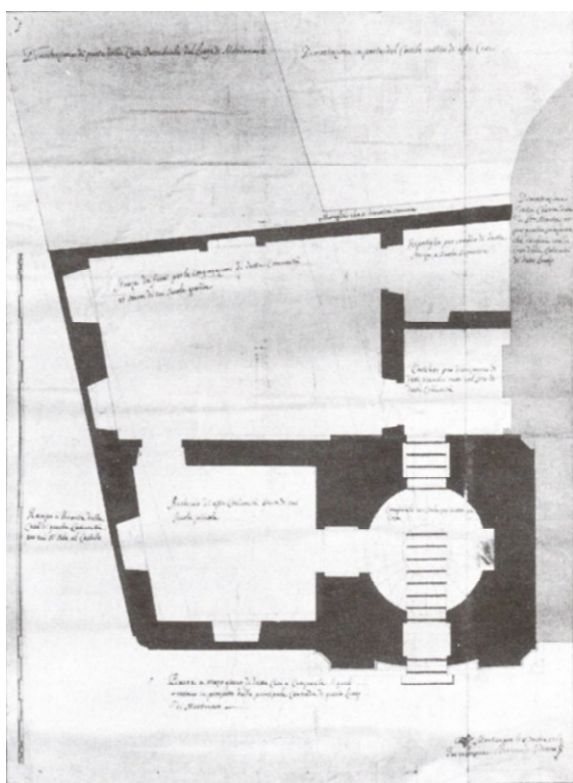


Figura 13 - Prima soluzione

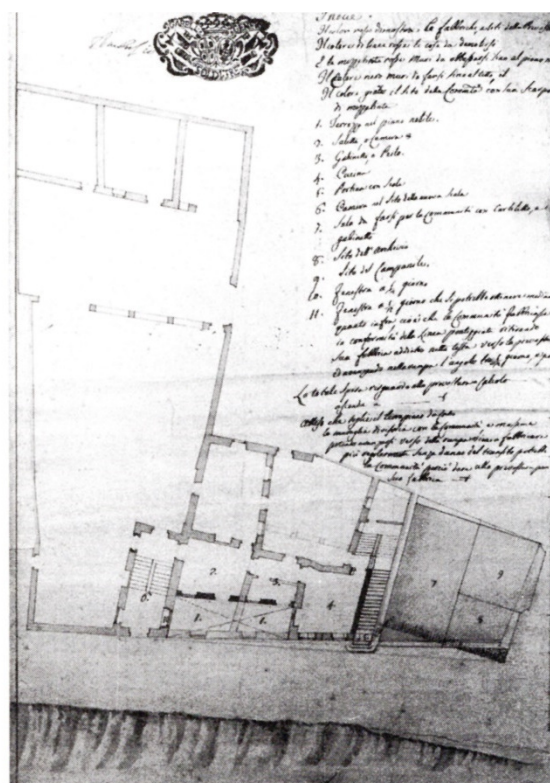


Figura 14 - Seconda Soluzione

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di progettazione

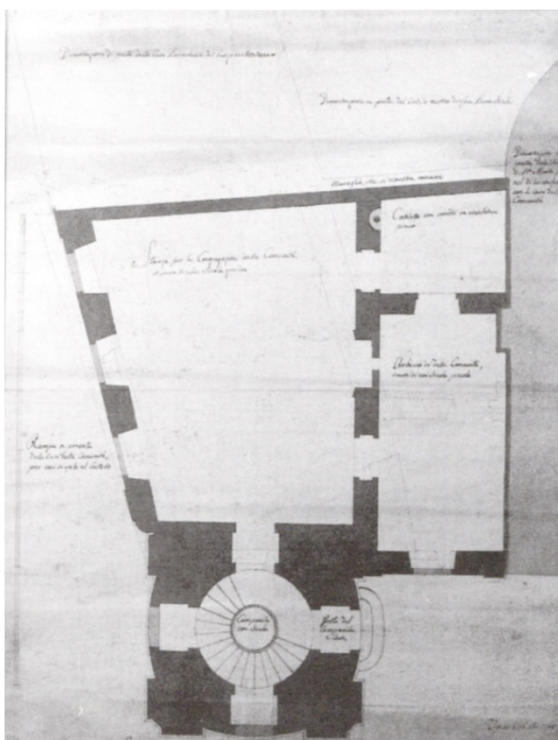


Figura 15 - Terza soluzione

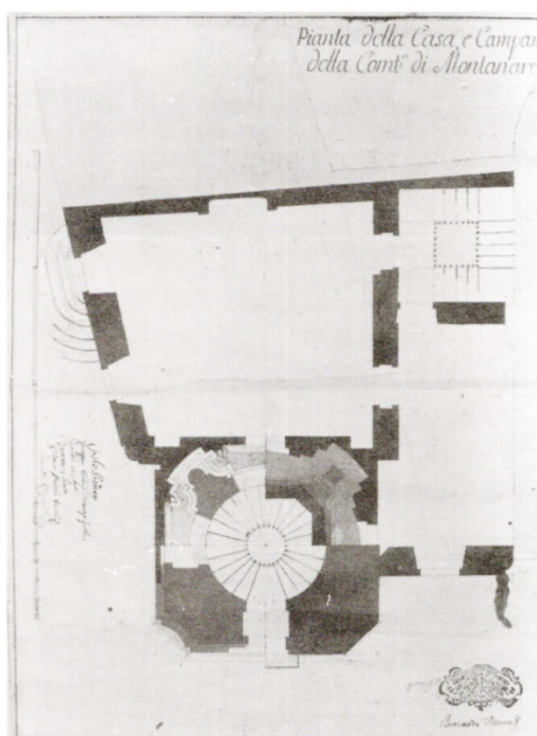


Figura 16 - Soluzione definitiva

Il campanile in prospetto mostra i diversi livelli cui è articolato, che dal basso verso l'alto diminuisce in sezione e si svuota di forme rigide e smussate sostituite da forme morbide, curve e decori. Su un basamento strombato a quattro spigoli vivi, sormonta un primo volume sempre squadrato dove sono inserite delle finestre rettangolari ma questa volta con spigoli svuotati da un arco.

Un volume di raccordo ospita il sistema di campane adornato da elementi classici, innestandosi con il volume sottostante con un cilindro centrale e quattro masse angolari sulle quali si inseriscono colonne ioniche, al di sopra un attico e quattro pinnacoli ornamentali a vertice una guglia, la palla e una croce.

In generale Vittone pone delle regole di proporzionalità delle parti dettate dalla larghezza e altezza della cella campanaria, in particolare l'altezza del volume che ospita le campane corrisponde all'altezza dell'attico insieme alla guglia estrema e l'altezza dell'intero campanile corrisponde a otto volte la sua larghezza.

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di progettazione

Insieme ai disegni conservati all'interno dell'Archivio di Montanaro sono pervenuti diversi documenti che descrivevano il cantiere e le indicazioni riguardo la sua organizzazione.

Tra il 22-26 agosto del 1769 d.C. si registrano le due istruzioni che Bernardo Vittone scrive in merito ai requisiti a cui l'impresario appaltatore doveva rispondere in termini di capacità e qualità di intervento, all'interno inoltre vi erano indicazioni molto dettagliate sulla divisione degli impegni tra l'impresario e la Comunità. Nella seconda istruzione viene inserito anche un documento contenente il preventivo di somma 13898 lire e soldi 15.

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di costruzione

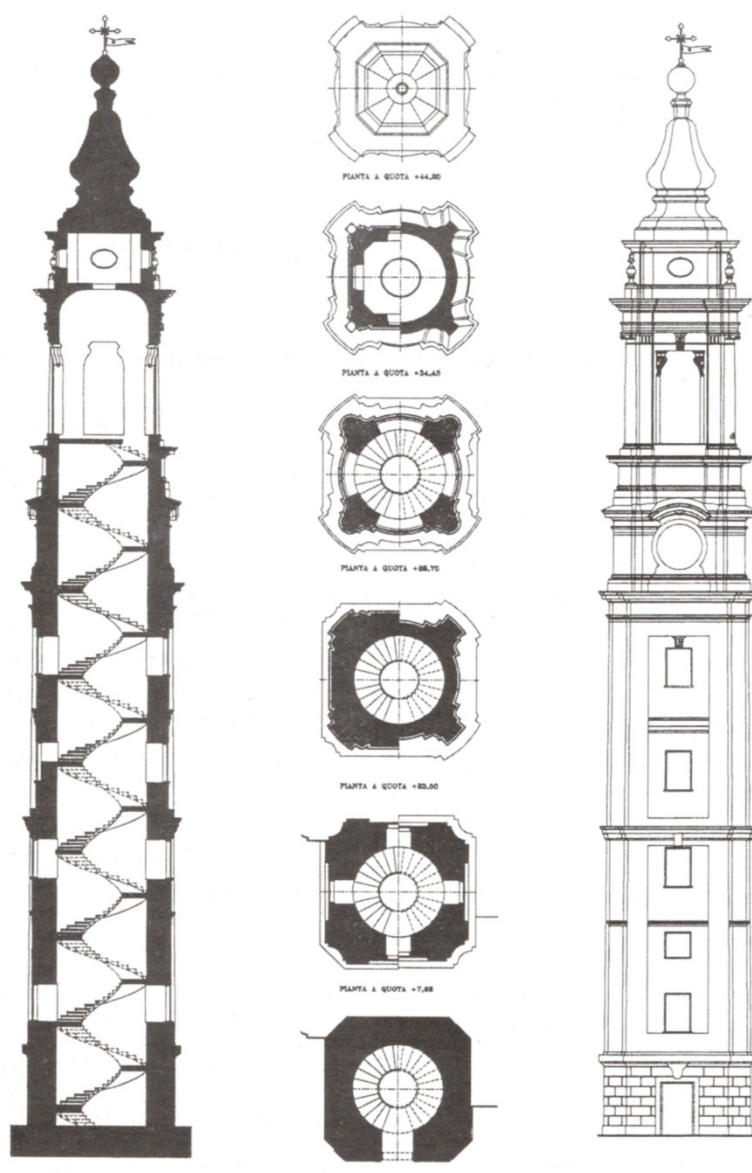


Figura 17 - Sezione, piante e prospetto, Campanile di Vittone

Fonte: Battaglio, M. (2000). *L'ultimo di Vittone, il Campanile di Montanaro nuovi rilievi e fonti d'archivio*, Litoart.

2.4.Fase di costruzione

L'inizio del cantiere si registra in data del 27 agosto del 1769 d.C. e successivamente nel 1770 d.C. dalla "Memoria" viene richiesta la demolizione dei

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di costruzione

ruderi preesistenti e l'ottenimento dei materiali da costruzione necessari, calce, pietre, mattoni e altro *"[...] Li 8 Febbraio ha fatto richiesto calcolo delle pietre per la Casa e Campanile"*¹⁰.

Tra il 19 e il 22 aprile fino al 12 maggio si registrano i primi lavori di tracciamento del terreno e la realizzazione delle fondazioni *"[...] Li 19 Aprile (1770) vacato sopra il Luogo con Assistente Misuratore a fare il tracciamento della Casa e Campanile"*¹¹ inclusa la costruzione della torre in corrispondenza del primo solaio della casa comunale.

Nella primavera del 1770 d.C. inizieranno i lavori di costruzione del nuovo complesso, cantiere che durerà complessivamente per due anni, in un tempo relativamente breve fino al 1772 d.C..

Alla morte di Vittone, il 19 ottobre del 1770 d.C., l'architetto Mario Ludovico Quarini porterà avanti l'opera iniziata.

Dal 9 maggio ebbe inizio la demolizione della preesistente casa comunale e il recupero di parte dei materiali per un suo reimpiego nella nuova costruzione.

Il 25 maggio, dopo aver fatto rifornimento dei materiali necessari iniziano i lavori di messa in opera delle parti in elevazione, iniziando dal muro della sala del consiglio in prossimità della salita del castello e il 18 giugno l'angolo tra l'archivio e il campanile, che proseguono fino in data 31 ottobre.

Il 6 maggio dell'anno successivo veniva realizzata l'elevazione delle parti superiori del campanile.

Il 15 giugno del 1771 d.C. si registra la costruzione del piano dell'orologio che si mostrerà essere di complessa modellazione fino al 16 luglio.

¹⁰ op. cit.: Memoria, 18 gennaio 1770

¹¹ ibidem

Il campanile della Chiesa di Santa Marta - Fase di costruzione

Il 21 luglio si registra la fabbricazione della scala elicoidale che sarà collaudata dallo stesso Quarini.

Il 25 settembre in attesa di decidere il rivestimento della guglia si decide di creare un tetto temporaneo.

Nel novembre del 1771 d.C. si registrano alcune opere di finitura, tra cui la realizzazione di ringhiere nel livello della cella campanaria e cornici intorno agli orologi, la rettifica delle finestre e la messa in opera di davanzali e la formazione dei solai.

A conclusione del cantiere vengono intonacate tutte le facciate e il 22 dicembre del 1872 d.C. il cantiere, dopo il collaudo generale della torre si può considerare ufficialmente concluso.

2.5.Sistemi costruttivi

All'interno dei giornali di cantiere troviamo informazioni sull'utilizzo dei materiali e l'elenco di tutte le forniture con i nomi di tutti i fornitori e delle persone che contribuirono alla costruzione del campanile e della nuova casa comunale. In alcune Note¹² e dal Giornale di Cantiere¹³ redatti da Giovanni Antonio Magnano assistente del capomastro si registra l'utilizzo di tipo "ordinario" per le fondamenta e le sottomurazioni, "muraglia grigia in copertina", "grigia senza copertina" e di "mattoni", per le parti in elevato.¹⁴

La muratura grigia in copertina prevedeva un esterno in mattoni e un interno a corsi di pietre e mattoni e fu impiegata per la realizzazione delle fondazioni e per il basamento del campanile.

La muratura grigia formata da un corso di mattoni e uno di pietre fu utilizzata invece per la maggior parte su tutta la casa comunale, all'esterno e all'interno fino all'imposta delle volte.

Vittone sceglie per il basamento un rivestimento di intonaco che riproduce delle bugne lapidee mascherate. Il basamento del campanile venne realizzato con due

¹² ASC Montanaro, Classe 7, mazzo 694, 1770.

Nota delle giornate provviste e impiegate dal Capo M. Carlo Ronco. Nota del Lavoro fatto e fatto fare dal Capo M. Carlo Ronco a trabbo attorno il Campanile e fabbrica di questa Com.tà.

Nota osia Ristretto dei materiali somministrati.

¹³ ASCM, Classe 7, mazzo 694. Giornale di Cantiere del 1770.

¹⁴ Bernardo Vittone, Istruzioni Elementari, Osservazione II, *De' muri*: «Le più in uso però sono quattro; cioè, primo, quelle, che siccome il sono, così diconsi di *mattoni*, secondo *le ordinarie*; terzo, le *grigie*, quarto, quelle che li chiamano *con copertina*. Si fanno le prime intieramente di mattoni posti in piano, ed intrecciati di corto in corto fra loro, e sono le migliori quelle quattro sorta. [...] Le ordinarie si compongono con pietre rozze di fiume, o di rottame di rocca, facendovi ad ogni tre o quattro corsi di esse ricorrere un'ordine intieramente di mattoni. Si formano le grigie con far alternamente un corso di mattoni, indi un'altro di pietre della qualità anzidetta. Le ultime finalmente si fanno come le ordinarie, fuorché nella fronte esteriore, che tutta constar deve di mattoni a corsi alterni or per lungo, or per traverso collocati».

tipologie di muro, metà pietra e metà mattone, mentre quelli superiori al primo piano in cui appaiono le prime finestre con paramenti in cotto.

La scala elicoidale interna è costruita interamente in massello di pietra connessa con il muro perimetrale con catene di ferro di collegamento.

Gli infissi in noce e coperture dei cornicioni degli orologi, dell'ordine e su quello dell'attico, in conci di pietre colore grigio chiaro evitando l'utilizzo di coppi o della lamiera per garantire una maggior performance di durabilità della cromaticità nel tempo.

Per la realizzazione dei pinnacoli nel livello attico fu impiegata pietra di Gassino mentre per la guglia e le opere di finitura una lamiera di zinco.

Tutti i materiali e gli elementi costruttivi erano indicati e calcolati all'interno di un documento¹⁵ redatto nella seconda fase dei lavori dall'Architetto Quarini che dirigerà il cantiere dopo la morte del Vittone.

¹⁵ASCM, Classe 7, mazzo 694, Misura dei lavori fatti dal Mastro Carlo Ronco attorno il Campanile della com.tà di Montanaro nell'anno 1771 colla risposta data dall'Arch. Quarino alle prettese date in scritte dal detto Ronco, 24 settembre 1771.

2.6. Restauri successivi e conservazione del bene

L'inaugurazione del campanile è datata al 1772 d.C., successive a quella data ci furono frequenti opere di manutenzione e valorizzazione.

Nel 1805 d.C. alcuni restauri furono fatti per la valorizzazione della torre: gli orologi originali vennero sostituiti sulle quattro facciate inserendone di moderni con lancette delle ore e dei minuti. Inoltre, venne rinnovato l'impianto campanario e verso la metà dell'1800 d.C., in occasione degli interventi di carattere urbano che interessarono tutta l'area di montanaro venne realizzata la pompa d'acqua sullo spigolo destro del campanile che permise un utilizzo pubblico del pozzo. Un successivo e ultimo restauro della torre campanaria fu eseguito nel 1930 d.C., un intervento consistente che avrebbe sostituito parti originarie dell'edificio. Più precisamente, l'intervento avrebbe compreso il rintonaco delle murature e la successiva tinteggiatura a calce, la ricostruzione delle parti degradate quali i cornicioni, le cornici, gli aggetti e le decorazioni, compresa anche la copertura e la guglia.

Oggi allo stato di fatto, il campanile mostra stati di criticità di alterazione, degrado e dissesto dei materiali, in particolare negli elementi murari e lapidei delle facciate esterne e problematiche strutturali della scala interna rivelando una necessità di intervento per la sua conservazione.

Il campanile fa parte del complesso Vittoniano, oggi sede di mostre e attività culturali e, il recupero dell'edificio potrebbe accrescerne il valore agevolando una maggiore affluenza di visitatori. Al fine di rendere fruibile e salvaguardare la valenza storica della torre è necessario un progetto di riqualificazione che ne preservi la costruzione andando ad effettuare operazioni di consolidamento strutturale, messa in sicurezza della scala interna e di risanamento e restauro dei fronti esterni.

I metodi e tecniche del rilievo 3D

Negli ultimi anni l'evoluzione tecnologica ha permesso l'introduzione di nuovi strumenti e tecniche di rilievo tridimensionale sempre più performanti, ad alta precisione e di facile trasportabilità. In ambito dei Beni Culturali, l'impiego di queste tecnologie è di particolare interesse per la sempre più frequente richiesta di integrare all'esistente archivio cartaceo, una documentazione digitale del patrimonio architettonico storico.

Le tecniche innovative del rilievo 3D si basano sull'utilizzo di sensori ad elevate prestazioni e software complessi in grado di acquisire, elaborare e gestire dati geo-referenziati e derivarne un modello accurato e il più possibile aderente alla realtà.

I principali metodi di rilievo tridimensionale utilizzano sistemi non a contatto basati sull'utilizzo di onde luminose e sono classificati in:

Image-based: questa tecnica impiega dispositivi dotati di *sensori ottici passivi*, generalmente a basso costo, basati sull'utilizzo della luce naturale dell'ambiente da rilevare. Tra queste tecniche, la più diffusa è la Fotogrammetria, che, attraverso l'acquisizione ed elaborazione di immagini bidimensionali estrae informazioni metriche e restituisce un modello virtuale 3D. Le immagini possono essere acquisite via aerea (UAV), via satelliti o tramite una camera fotografica posizionata sul terreno.

Range-based: in questo caso sono impiegati *sensori attivi*, a costo elevato, che acquisiscono e ricostruiscono in maniera accurata oggetti tridimensionali basandosi sulla luce artificiale. Il sensore rileva le misure di distanze tramite l'emissione di un segnale elettromagnetico. Attualmente esistono differenti tipologie sul mercato quali laser scanner a triangolazione, a tempo di volo, differenza di fase, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, e stazioni totali.

Oggigiorno, nell'ambito del rilievo architettonico tridimensionale, è necessario pianificare il rilievo ed individuare quale metodo adottare in base alla tipologia di oggetto o ambiente da rilevare e all'accuratezza finale che si vuole ottenere nei prodotti del rilievo.

In molte applicazioni, sulla base della complessità, della scala del sito o del complesso architettonico, come nel caso del Campanile di Vittone, vengono combinati più metodi, image-based e range-based, cercando di sfruttare le potenzialità del singolo, al fine di ottenere un miglior prodotto finale, accurato e preciso.

3.1. Inquadramento topografico - La topografia

La topografia è una disciplina della Geomatica che si occupa di determinare le caratteristiche metriche, attraverso procedure di rilievo, di oggetti o porzioni di territorio, al fine di ottenere una rappresentazione grafica mediante la determinazione di punti e la loro geolocalizzazione.

Il rilievo topografico consiste nell'individuare un considerevole numero di punti che ci consentono di costituire una base solida su cui effettuare tutte le operazioni successive.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

Questi punti sono identificati in tre fasi temporali e vengono classificati in tre categorie che seguono una gerarchia: rete di inquadramento, rete di raffittimento e rete di dettaglio.

Nella prima fase di un rilievo architettonico viene definita una rete topografica di vertici, ossia di punti scelti in numero limitato e distribuiti in modo omogeneo sul terreno. I punti della rete di inquadramento verranno misurati e geolocalizzati, per mezzo di ricevitori GNSS o stazioni totali, all'interno di un sistema di riferimento locale o globale costituendo l'ossatura portante di tutte le fasi successive del rilievo e di misura.

Una volta individuati e materializzati i vertici della rete di inquadramento, è possibile creare una seconda rete, detta rete di raffittimento.

Questa fase avviene nel caso di rilievi di grande estensione e serve ad aumentare il numero di vertici della rete di inquadramento per avere una copertura maggiore dell'oggetto da rilevare.

Nell'ultima fase aumenta il numero di punti da rilevare ed è possibile effettuare il rilievo di dettaglio con altre tecniche, quali ad esempio la fotogrammetria o il metodo topografico della celerimensura.

Tramite la tecnica della celerimensura vengono individuati tutti quei punti dell'oggetto che lo descrivono geometricamente e la loro posizione plano-altimetrica.

Ogni punto è identificato nelle sue coordinate polari per mezzo di una Stazione totale che ne descrive l'angolo azimutale, zenitale e la distanza inclinata che intercorre tra il punto da collimare e la stazione.

3.1.1. La Stazione totale

Qualche decennio fa, le misurazioni topografiche, venivano effettuate per mezzo di un teodolite ottico, uno strumento capace di misurare angoli ad elevata precisione. Con l'evoluzione elettronica, tutte le operazioni manuali dello strumento, come la lettura dei dati e di conseguenza tutti i sistemi ottici interni, vennero sostituite con processi digitali e automatici. Verso la fine degli anni '70 nasce la Stazione totale dall'unione di un teodolite e di un misuratore di distanze detto distanziometro elettronico.

Oggi, lo strumento è sempre più motorizzato nelle parti e nei movimenti che lo compongono. I dati misurati sono consultabili in un display touchscreen o da un palmare con cui è possibile realizzare le misure da remoto. La stazione totale mediante il metodo celerimetrico determina la posizione dei punti individuati sull'oggetto, misurando gli angoli zenitali, azimutali e le distanze inclinate. Dalle misure di angoli e distanze, lo strumento elabora altre misure quali: dislivelli, come differenza di quota tra due punti.

Avendo noti distanze e angoli è possibile ottenere le coordinate cartesiane tramite calcoli successivi, utili ad esempio per la determinazione delle coordinate dei vertici della rete topografica.

In generale dati due punti A e B da collimare e un punto di stazione O, si definiscono:

- **angolo azimutale**, l'angolo che si forma tra due piani verticali passanti dai punti A e B intersecanti la verticale passante e per il punto di stazione O.
- **angolo zenitale**, l'angolo che si forma tra la verticale passante per il punto di stazione O e la direzione OA

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

- **distanza inclinata**, la distanza che intercorre tra il punto di collimazione A o B e il punto di stazione O

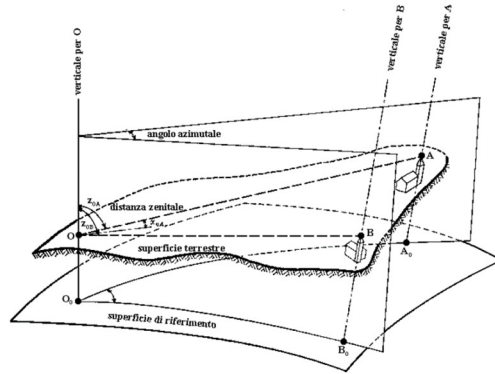


Figura 18 - Rappresentazione grafica: angolo zenitale, azimutale, distanza inclinata.

Fonte: dispense Laboratorio di Geomatica per la modellazione dell'Architettura

Generalmente la struttura di una stazione totale è formata da:

- **Basetta**, montata su un treppiede, composta da una placca di base e da una placca superiore, dotata di viti calanti e livella sferica che permette di direzionare verticalmente l'asse primario a_1 , e un piombino ottico che consente di disporre verticalmente lo strumento.
- **Alidada**, dotata di cerchi impiegati per le letture angolari, di sensori, di dispositivi elettronici e di piccoli motori elettrici che permettono la rotazione intorno all'asse primario generando un asse secondario a_2 perpendicolare a a_1 .
- **Cannocchiale**, dotato di un obbiettivo, è impiegato per individuare il punto e collimarlo e determinare la distanza. Esso ruota attorno all'asse secondario a_2 e genera un terzo asse a_3 detto asse di collimazione.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

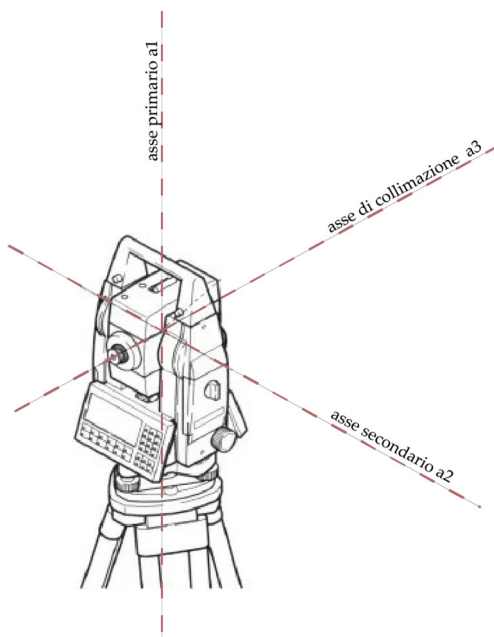


Figura 19 - Stazione totale: assi

Fonte: <https://gisresources.com/total-station-errors/>

- **Distanziometro**, integrato al cannocchiale, determina attraverso l'emissione di radiazioni la distanza inclinata tra il punto da collimare e lo strumento.
- **Prisma**, in base al metodo che si vuole impiegare (con o senza prisma), viene utilizzato per misurare le distanze: il segnale generato dalla stazione totale viene riflesso dal prisma e torna alla stazione che acquisisce la distanza misurando lo sfasamento tra il segnale in uscita e quello in arrivo.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

- **Goniometro elettronico**, attraverso cerchi graduati rileva digitalmente gli angoli ad una precisione elevata che varia in base allo strumento.



Figura 20 – Esempio di Stazione totale Leica TS 13

Per effettuare delle misure correttamente è necessario che lo strumento sia rettificato ovvero che siano rispettate le condizioni di verticalità tra asse primario e asse secondario, e tra asse secondario e asse di collimazione.

La prima operazione di un rilievo topografico è la messa in stazione, che corrisponde nel posizionare la Stazione sulla verticale di un punto posto sul terreno, di solito materializzato da un chiodo topografico, e individuarlo mediante il piombino ottico. Dopo la fase di stazionamento è possibile effettuare le misure centrando nel reticolo corrispondente il centro ottico dell'obbiettivo del cannocchiale, i punti individuati sull'oggetto da rilevare. Una volta acquisite le misure, queste vengono registrate in una memoria interna dello strumento da cui è possibile il trasferimento in un computer tramite cavo, memory card o in modalità wireless e successivamente elaborate all'interno di programmi specifici.

La misurazione da stazione totale può avvenire secondo due modalità:

- **Senza prisma:** è possibile calcolare le misure con la presenza di un solo operatore, non è necessario l'utilizzo di un prisma poiché la riflessione del

raggio avviene direttamente sulla superficie dell'oggetto e la misura viene rilevata dallo strumento calcolando il tempo che impiega il raggio laser ad andare e ritornare dal punto da collimare e l'obbiettivo del cannocchiale. Con questo metodo è possibile rilevare distanze in range massimo di 600 metri con una precisione di 4-5 mm.

- **Con prisma:** in questo caso è necessaria la presenza di due operatori, il primo controlla le operazioni di misura dalla stazione totale mentre il secondo posiziona nei punti da collimare un prisma riflettente, che viene colpito dal raggio infrarosso. La precisione delle misure risulta essere maggiore rispetto a quelle effettuate senza prisma, di circa 1-2 mm, in un range di misurazione di circa 3 km.

3.1.2. Sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System)

Il GNSS (Global Navigation Satellite System) è un sistema di geolocalizzazione mondiale ad elevata precisione che consente di determinare la posizione di un qualsiasi punto della superficie terrestre o dell'atmosfera basandosi sulla ricezione di segnali radio trasmessi da più costellazioni di satelliti artificiali.

Un sistema satellitare generico per la stima di un punto, si basa sul calcolo del tempo impiegato da un segnale radio inviato da un satellite ad arrivare all'antenna ricevente, stimando la distanza tra l'antenna e il satellite con precisioni che vanno da qualche metro a meno del cm.

Il primo posizionamento satellitare nasce negli anni '90 per iniziativa degli Stati Uniti con il toponimo di GPS (Global Positioning System), impiegato per scopi militari e poi esteso ad applicazioni civili, e fino al 2001 fu l'unica costellazione di satelliti attiva e operativa.

Successivamente alcune nazioni non volendo dipendere unicamente dallo stato americano crearono nuove costellazioni di satelliti raggiungendo una copertura globale.

Le costellazioni GNSS attive attualmente sono cinque: GPS (USA), Glonass (GLObal NAVigation Satellite System, Russia), Galileo (Unione europea), Beidou (Repubblica popolare cinese) e IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System, India) di seguito si riportano in tabella le principali caratteristiche:

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

Costellazioni	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU	IRNSS
Anno di operatività	1994	2011	2016	2020	2014
Sistema orbitale di riferimento	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000	ECEF
n° satelliti	31	27	30	33	7
Altitudine orbita [Km]	20.180	19.000	23.616	21.500	35.788
Periodo orbitale	11h 58m	11h 16m	14h 05m	12h 53m	23h 56m
Piani orbitali	6	3	3	3	2
Inclinazione	55°	64,8 °	55°	55°	29°

Figura 21 - Tabella comparativa dei sistemi GNSS

Ogni costellazione prevede:

- **Segmento spaziale:** è una costellazione di satelliti, che orbitano intorno alla Terra ad una altitudine media di 21.150 Km dalla superficie terrestre, su tre o sei differenti orbite (in base al tipo di costellazione), con un periodo orbitale medio di circa dodici ore. Ogni satellite è definito all'interno di un sistema di riferimento inerziale, da coordinate spaziali (effemeridi) al variare del tempo e trasmesse verso la Terra attraverso segnali radio. La registrazione delle coordinate avviene in maniera accurata grazie all'utilizzo ad elevata stabilità di orologi di bordo (di solito tre-quattro) installati sui satelliti.
- **Segmento di controllo:** è l'insieme di stazioni che operano da Terra e svolgono funzioni di controllo e monitoraggio dei satelliti, calcolo delle orbite assicurandosi che gli orologi di bordo funzionino correttamente e spedizione dei dati riguardanti le orbite ai satelliti che a loro volta le trasmettono agli operatori a Terra.
- **Segmento utente:** è formato da tutti gli utenti e operatori che, tramite strumentazione opportuna, utilizzano i sistemi GNSS. In ambito topografico, è necessario essere dotati un'antenna che riceva il segnale inviato dai satelliti, un ricevitore che converta il segnale e registri i dati al

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

di sopra di un palmare munito di uno specifico software per la visualizzazione e l'elaborazione delle misure.

3.1.2.1. Tecniche di posizionamento

Per determinare la posizione di un punto della superficie terrestre, note le posizioni dei satelliti si deve stimare la distanza tra il satellite e il ricevitore. Questa operazione può avvenire mediante due metodologie: misure di codice (pseudorange) o misure di fase.

Nel primo caso le misure sono derivate dalla ricezione dei codici trasmessi dal segnale radio e permettono di eseguire misure con una precisione metrica con l'ausilio di un software a basso costo. Nel secondo caso le misure sono derivate dal calcolo della differenza di fasi tra il segnale portante e quello replicato dai satelliti al ricevitore. Con questo metodo è necessario l'utilizzo di un software molto potente in grado di acquisire e gestire i dati con precisione molto elevata. In base al metodo impiegato il posizionamento GNSS può essere di tipo:

- **Assoluto:** l'acquisizione delle coordinate di un punto viene effettuata con un solo ricevitore impiegando il metodo delle pseudo-distanze avendo definiti la localizzazione di almeno quattro satelliti, viene calcolata la pseudo-distanza tra i satelliti e il ricevitore a terra.

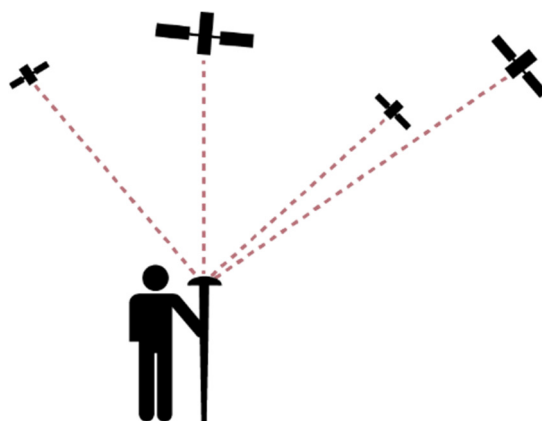


Figura 22 - Schema metodo di posizionamento assoluto

$$d = v \cdot \Delta t$$

Equazione 1. Dove d è la pseudo-distanza, Δt è il tempo impiegato dal segnale a percorrere la distanza tra il satellite e il ricevitore e v è la velocità media della luce.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

- **Relativo:** l'acquisizione delle coordinate di un punto viene effettuata da due o più ricevitori avendo noti la posizione dei satelliti, le fasi del segnale dei satelliti e della replica di ogni ricevitore. I due o più satelliti vengono tracciati contemporaneamente dai ricevitori determinando attraverso le differenze di coordinate (baseline) la posizione.

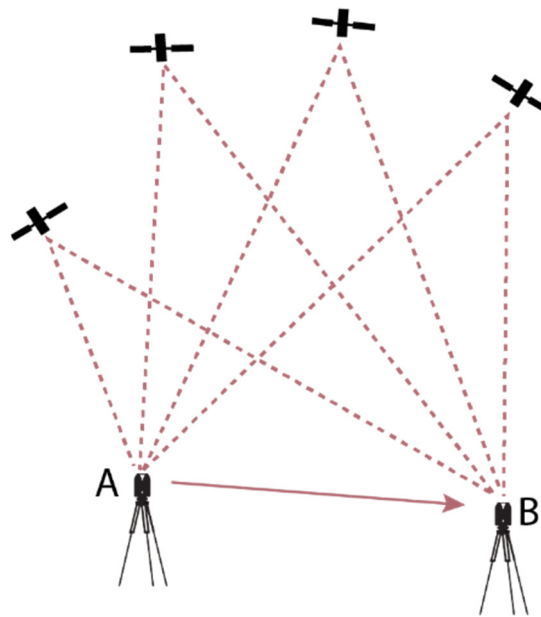


Figura 23 - Schema metodo di posizionamento relativo

- **Differenziale:** La posizione del ricevitore B è relativa a quella del ricevitore A, una stazione fissa di cui è nota la posizione la quale viene utilizzata come correzione differenziale di fase per determinare la posizione del secondo.

Il segnale di correzione elimina i possibili errori derivati dagli orologi dei Satelliti e dei Ricevitori e gli errori delle orbite, attenuando inoltre quelli atmosferici.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Inquadramento topografico - La topografia

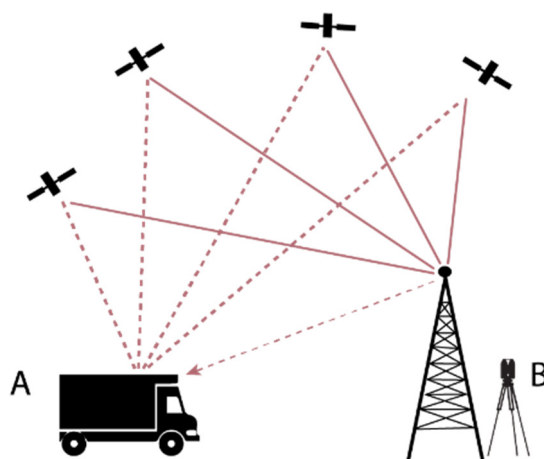


Figura 24 – Schema metodo di posizionamento differenziale: l'acquisizione delle coordinate di un punto viene effettuata da due ricevitori A e B.

Per le operazioni di rilievo topografico del Campanile sono stati misurati due vertici con ricevitore GNSS utilizzando il posizionamento relativo in modalità statica, usufruendo per il calcolo dei dati delle stazioni permanenti di Crescentino Torino e Cuorgnè. I vertici sono stati rilevati con un misuratore portatile di elevate prestazioni, lo Zenith 35 della GeoMax.

Lo Zenith35 è uno strumento dotato di 555 canali a multifrequenza che gli permettono di tracciare tutte le costellazioni operative. La precisione del ricevitore è molto elevata dell'ordine del centimetrico.

Di seguito si riportano in tabella le principali caratteristiche:

Modalità di acquisizione	RTK
Precisione del ricevitore RTK	Hx 8 mm \pm 1 ppm (rms)
	V 15 mm \pm 1 ppm (rms)
Canali	555
Tracciamento GPS	L1, L2, L2C, L5
Tracciamento GLONASS	L1, L2, L3
Tracciamento BeiDou	B1, B2, B3
Tracciamento Galileo	E1, E5a, E5b, AltBOC, E6
Peso	1,17 kg
Dimensioni	h = 131 mm
	o = 161 mm



Figura 25 - Zenith 35, GeoMax

3.2.Cenni di fotogrammetria

La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici. [Manual of Photogrammetry, ASPRS, 1980]

La sua origine è conseguente alla nascita della fotografia a metà dell'Ottocento, ma solo negli ultimi cinquanta anni, si è consolidata diventando uno dei metodi più adottati per la realizzazione di prodotti cartografici e tridimensionali.

La fotogrammetria fu fondata nel 1859 da A. Laussedat¹⁶, presentando per la prima volta alla Commissione dell'Accademia delle Scienze di Parigi un documento che aveva come oggetto la determinazione di coordinate di punti derivate dall'intersezione dei raggi proiettivi di due fotografie. In questa prima fase di sperimentazioni si effettuarono i primi rilevamenti terrestri, con l'obiettivo di realizzare cartografie e mappe topografiche ma con risultati approssimativi dovuti dalla distorsione degli obiettivi fotografici.

È possibile classificare l'evoluzione della fotogrammetria in più fasi temporali caratterizzate da strumenti e tipologia di elaborazione dei dati differenti.

3.2.1. Fotogrammetria analogica

Tra il 1900 e il 1960, la Fotogrammetria sviluppò strumenti analogici molto grandi e complessi che permettevano di determinare le coordinate tridimensionali per via ottico-meccanica. In questi anni, venne introdotta la visione stereoscopica da

¹⁶ Goramasca M., (2004). Elementi di Geomatica, Associazione Italiana di Telerilevamento, Varese.

parte di C. Pultrich per il riconoscimento di punti omologhi su due fotogrammi differenti. Inoltre, E. Von Orel realizzò il primo stereo-autografo che consentì una restituzione metrica, più precisa, risolvendo il problema di proiezione da una coppia di fotogrammi attraverso l'uso di restitutori analogici.

3.2.2. Fotogrammetria analitica

Dopo il 1960, con l'evoluzione della tecnologia e l'introduzione dei computer, il processo di ricostruzione tridimensionale analogica venne sostituita dalla modellazione matematica tramite la risoluzione per via analitica di un certo numero di equazioni.

3.2.3. Fotogrammetria digitale

Dal 1990 in poi, con l'avvento della fotografia digitale, vennero impiegate nella fotogrammetria immagini numeriche, ovvero costituite da una matrice di elementi chiamati pixel.

Con l'incremento delle prestazioni del computer oggi è possibile estrarre informazioni metriche da immagini digitali ad alta risoluzione per mezzo di software e hardware con elevata capacità di calcolo.

3.2.4. Classificazione delle camere per applicazioni fotogrammetriche

Le camere da presa vengono classificate in base alla precisione di acquisizione e alla conoscenza dei parametri di orientamento interno.

- **Camere metriche:** nate per scopi fotogrammetrici, dispongono di obbiettivi che sono in grado di minimizzare la distorsione radiale. I parametri di orientamento interno vengono definiti tramite operazioni di calibrazione e riportate dalla casa costruttrice all'interno del certificato della camera.
- **Camere semimetriche:** la precisione di questa tipologia di camere è minore rispetto a quelle metriche, questo perché dotate di un obiettivo che presenta deformazioni maggiori. I parametri di orientamento interno sono definiti avendo nota la curva di distorsione dell'obiettivo.
- **Camere amatoriali:** sono camere a uso commerciale di basso costo, che comportano un risultato finale di minore precisione.

Nel campo della fotogrammetria, si sono diffuse negli ultimi anni e vengono sempre più impiegate, attraverso procedure e l'utilizzo di software, come validi strumenti per un rilevamento professionale.

I parametri di orientamento interno non sono noti e devono essere determinati tramite la procedura di autocalibrazione.

3.2.5. Modalità di acquisizione

La fotogrammetria, come già precedentemente esposto è una tecnica image-based che consente di determinare le caratteristiche geometriche di oggetti tridimensionali tramite l'acquisizione ed elaborazione di immagini fotografiche.

In base alla presa fotografica viene suddivisa in:

- **Fotogrammetria satellitare:** le tecniche fotogrammetriche vengono applicate ad immagini satellitari ad alta risoluzione per la produzione di dati cartografici, carte tematiche e ortofoto.
- **Fotogrammetria aerea:** la camera fotografica è posizionata su un velivolo e la ripresa avviene ad una quota maggiore di trecento metri. Viene utilizzata per la realizzazione di carte topografiche e modelli digitali di superficie (DSM) e modelli digitali del terreno (DTM). In base all'inclinazione della camera fotografica si possono acquisire riprese nadirali, quando il piano di presa è parallelo al terreno o oblique quando il piano di presa è inclinato rispetto al terreno.
- **Fotogrammetria da drone:** quando la camera fotografica è posizionata su un velivolo e la ripresa avviene ad una quota minore di trecento metri. In questa categoria rientra la fotogrammetria UAV (Unmanned Aerial Vehicle), impiegando dispositivi aerei privi di pilota telecomandati in remoto in grado di acquisire fotografie ad elevata risoluzione.
- **Fotogrammetria terrestre:** la ripresa fotografica è effettuata da una stazione posta sul terreno. Generalmente vengono effettuati rilievi di edifici o di oggetti che distano massimo 200 metri. A seconda della posizione e dell'orientamento degli assi delle camere fotografiche la ripresa può essere ad *assi paralleli* o ad *assi obliqui*¹⁷.

¹⁷ Cannarozzo, Cucchiari, Meschieri, (2012). Misure, rilievo, progetto, Zanichelli editore.

Nel primo caso, la presa è detta **presa normale o stereoscopica** e prevede la disposizione di due camere fotografiche i cui assi ottici sono tra di loro paralleli e perpendicolari al terreno.

Per definizione gli assi essendo rette parallele convergono all'infinito e riproducono ad una distanza relativamente grande dalle camere, sul piano focale, le coordinate dei punti dello spazio reale.

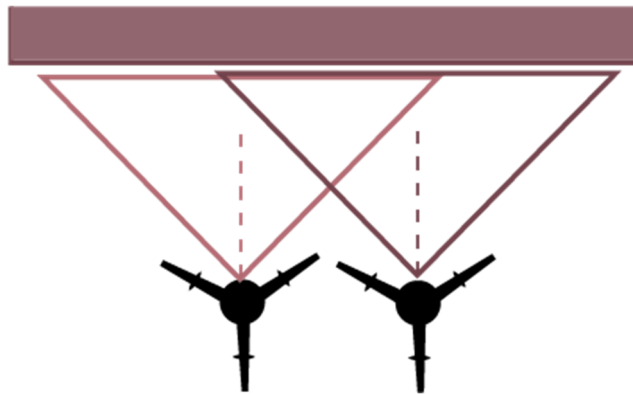


Figura 26 - Schema presa normale, rielaborazione dell'immagine (Zanichelli,2012)

Nel secondo caso, una presa ad assi obliqui prevede la disposizione di due camere fotografiche posizionate ad una distanza ravvicinata, i cui assi ottici risultano inclinati rispetto alla base ma conservando comunque il loro parallelismo.

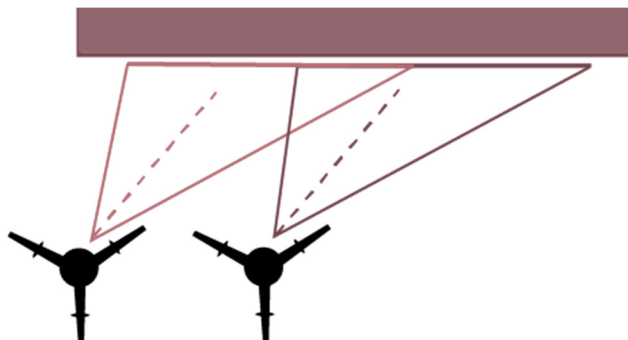


Figura 27 - Schema assi obliqui, rielaborazione dell'immagine (Zanichelli,2012)

In generale i prodotti derivati dall'elaborazione di fotografie aeree, satellitari o terrestri possono essere di tipo *numerico o grafico*.

Le rappresentazioni numeriche derivano dalla determinazione di coordinate tridimensionali di punti degli oggetti rilevati, con cui è possibile realizzare carte topografiche, tematiche, profili altimetrici e modelli tridimensionali degli oggetti o digitali del terreno (DTM) e modelli digitali di superficie (DSM).

Le rappresentazioni grafiche sono immagini fotografiche rielaborate su cui è possibile effettuare misure, quali fotopiani e ortofoto.

3.2.6. Visione stereoscopica

La teoria della Fotogrammetria si basa sul principio della stereoscopia, riproducendo un processo fisiologico naturale dell'uomo quando utilizza la vista; nel momento in cui si osserva un oggetto, sulle retine si formano due immagini di questo, leggermente diverse poiché acquisite da due punti di vista differenti (occhio sinistro e occhio destro), il cervello automaticamente consentirà la visione tridimensionale tramite una fusione delle due immagini in una unica, realizzando una visione stereoscopica dell'oggetto.

In maniera analoga lo stesso processo avviene in Fotogrammetria e viene applicato durante la presa di uno oggetto o di un ambiente, posizionando due camere fotografiche in due posizioni differenti.

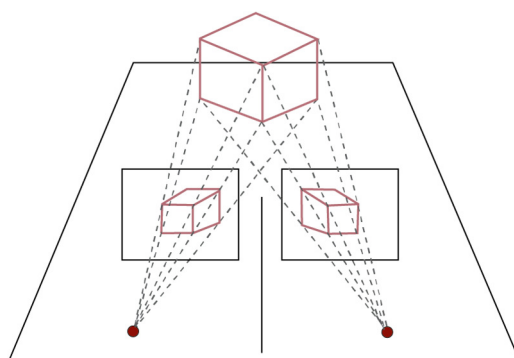


Figura 29 – Stereoscopia

L'effetto stereoscopico nella fotogrammetria tradizionale consente di individuare i punti omologhi di due fotogrammi se rispettate alcune condizioni:

- le immagini acquisite devono condividere una parte della stessa area (overlap)
- l'acquisizione deve essere effettuata ad una stessa quota per entrambe le fotografie
- gli assi di presa devono essere il più possibile paralleli tra di loro
- la distanza tra i due punti di vista deve essere $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{4}$ della distanza tra le camere e l'oggetto

3.2.7. Le fasi del processo fotogrammetrico

Il processo fotogrammetrico si basa sul mettere in relazione le coordinate spaziali dell'oggetto reale con le coordinate immagine bidimensionali derivate dalle prese fotografiche, utilizzando un modello matematico detto principio della collinearità e la presa di almeno due immagini.

Il sistema di equazioni di collinearità viene risolto tenendo conto di alcuni parametri detti di orientamento interno, caratteristiche costanti della macchina fotografica e di orientamento esterno, individuati dalla sua posizione durante la presa.

Le fotografie ottenute per applicazioni fotogrammetriche vengono ricondotte ad un modello teorico ideale a proiezione centrale il cui centro di proiezione è il centro ottico dell'obbiettivo.

Una proiezione centrale è ottenuta proiettando su un piano di proiezione i punti dell'oggetto, da un punto esterno detto centro di proiezione. L'intersezione delle rette passanti per il centro di proiezione, con il piano di proiezione rappresentano le coordinate immagine dell'oggetto.

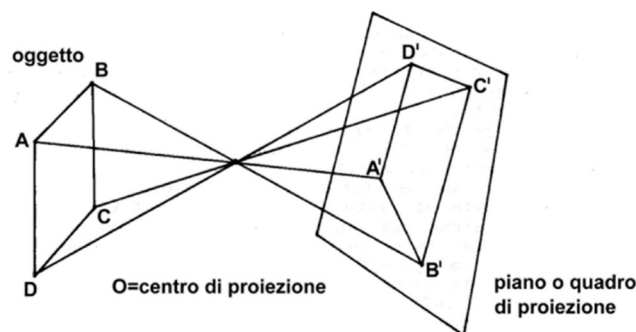


Figura 30 - Proiezione centrale, schema esemplificativo

Tuttavia, rispetto a questo modello teorico si deve tenere conto che un sistema ottico di una macchina fotografica è costituito da un obbiettivo a più lenti, delle deformazioni di pellicola (se presente) e delle distorsioni dei raggi proiettivi.

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Cenni di fotogrammetria

Una volta effettuato lo scatto fotografico, i raggi luminosi entrano all'interno dell'obiettivo e passano per i due punti nodali. La distanza tra i due punti nodali si può considerare nulla e assimilare il punto nodale posteriore al centro di proiezione detto centro di presa.

Il punto di proiezione sul piano fotografico è detto punto principale ed è generato dall'intersezione della retta perpendicolare passante per il centro di presa con il piano fotografico.

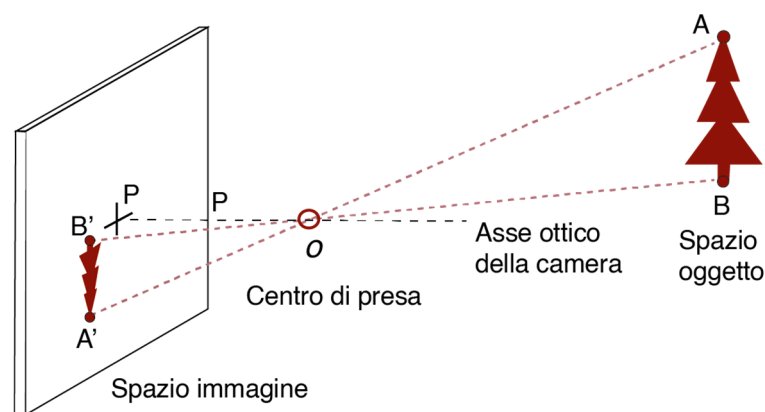


Figura 31 - Modello teorico applicato alla fotogrammetria, immagine rielaborata

Fonte: Cannarozzo, Cucchiaroni, Meschieri, (2012). *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli editore.

La distanza tra il centro di presa e il piano fotografico è detta distanza principale, un parametro costante, assimilabile alla distanza focale dell'obiettivo fotografico.

La conoscenza delle coordinate di proiezione del punto PP, della distanza principale e delle distorsioni dell'obiettivo determinano il centro di proiezione sul piano fotografico definendo l'*orientamento interno* del fotogramma. Una volta definita la posizione dei raggi proiettivi è possibile ricostruire la scena di acquisizione localizzando i fotogrammi nella stessa posizione nel momento della presa, ossia determinare i parametri di *orientamento esterno*: le tre coordinate del centro di proiezione e i tre angoli di rotazione definiti dalla camera fotografica.

Questa operazione viene riprodotta per ogni fotogramma acquisito, osservando che servono almeno due fotogrammi ottenuti in due differenti punti di presa, per determinare in modo univoco la relazione tra il punto terreno e il relativo punto immagine. Difatti, conoscendo la posizione dei punti immagine dei due fotogrammi, le coordinate tridimensionali dei due piani fotografici e dei due centri di presa, il punto omologo verrà individuato dall'intersezione dei due raggi proiettanti.

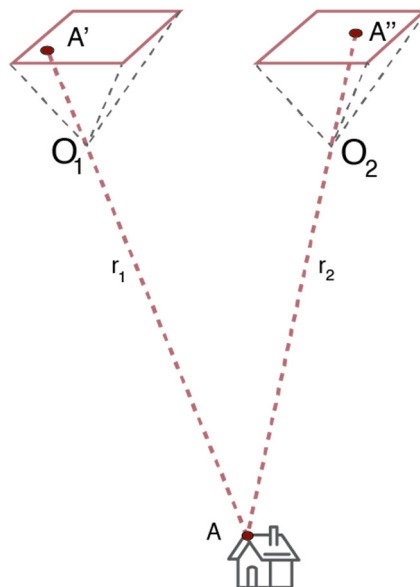


Figura 32 - Rappresentazione grafica dell'intersezione dei raggi proiettanti, immagine rielaborata

Fonte; Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, (2012). Misure, rilievo, progetto, Zanichelli editore.

3.2.8. Equazioni di collinearità

Le equazioni di collinearità rappresentano il principio di base del processo fotogrammetrico stabilendo la relazione tra le coordinate immagine e le coordinate dello spazio reale dell'oggetto di un punto. La collinearità è definita da una retta detta *retta di collinearità* che unisce il punto proiettato sul piano immagine con il corrispondente punto omologo dell'oggetto nello spazio reale.

Le equazioni di collinearità sono così definite:

$$x = f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_0$$
$$y = -f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_0$$

Equazione 2. Dove f è la distanza principale; X, Y, Z le coordinate del punto oggetto; X_0, Y_0, Z_0 le coordinate del centro di proiezione; x, y le coordinate del punto principale; x_0, y_0 le coordinate immagine e r i parametri di trasformazione.

Ogni punto viene misurato in almeno due immagini e definito da una coppia di equazioni che sono costituite da sei incognite rappresentanti i parametri di orientamento. Per risolvere il sistema è necessario avere almeno tre punti noti chiamati Ground Control Points (GCPs, punti di controllo sul terreno) punti di coordinate note misurati con strumenti topografici.

Nel caso siano noti i parametri di orientamento interno è possibile risolvere il sistema con il metodo dei minimi quadrati secondo il modello matematico di Gauss-Markov attraverso il metodo della triangolazione aerea (bundle block adjustment).

3.2.9. Calibrazione delle camere

Quanto descritto finora rappresenta il modello teorico ideale di presa a prospettiva centrale basato sul principio della collinearità. Nella realtà un obbiettivo produce diversi tipi di errori dovuti alle deformazioni e distorsioni delle lenti.

In un obbiettivo reale il raggio luminoso passa per il primo punto nodale e viene rifratto uscendo dal secondo punto nodale determinando il punto sul piano focale. Il raggio rifratto non è esattamente parallelo rispetto a quello incidente e ciò vuol dire che si determineranno due angoli leggermente differenti tra l'asse della camera e i due raggi. La distanza tra il punto proiettato dal raggio rifratto sul piano immagine e il punto incidente proiettato dal raggio incidente rappresenta la distorsione.

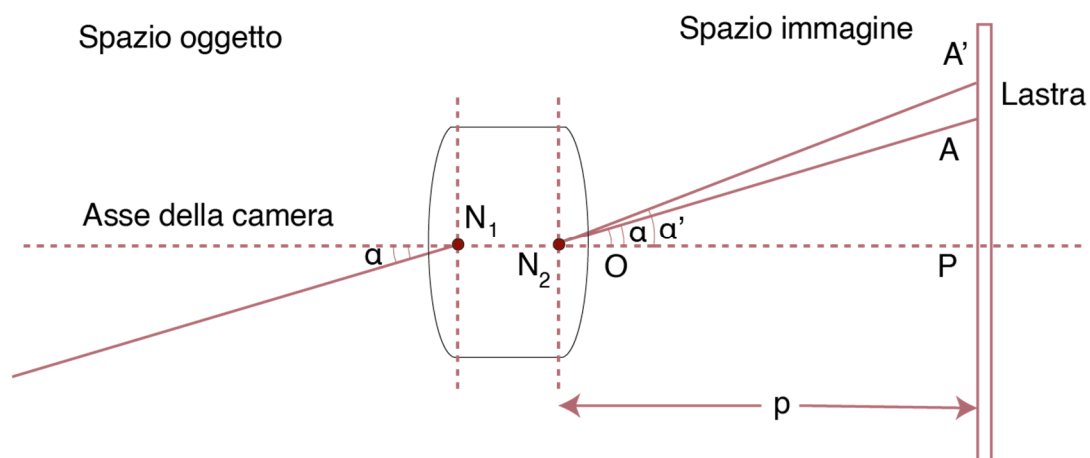


Figura 33 - Rappresentazione della distorsione, immagine rielaborata

Fonte: Cannarozzo, Cucchiari, Meschieri, (2012). *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli editore.

Per determinare il discostamento tra la realtà e il modello ideale si effettua la calibrazione della camera.

Il processo di calibrazione di una camera digitale è necessario per ottenere informazioni metriche tridimensionali del mondo reale attraverso l'impiego di immagini bidimensionali.

La calibrazione della camera stima i parametri interni di un obiettivo con cui è possibile correggere gli errori dovuti alla distorsione e determinare l'orientamento esterno della camera.

La calibrazione viene rappresentata da un modello matematico contenente **parametri estrinseci (orientamento esterno), intrinseci (orientamento interno) e parametri di distorsione** della camera da presa. Oltre a questi parametri nella compensazione degli errori si tiene conto di un fattore di scala per eventuali pixel non quadrati.

3.2.9.1. Parametri di orientamento esterno

I parametri estrinseci di una camera fotografica sono i parametri che definiscono la posa nella scena 3D e consistono in una rotazione e una traslazione delle coordinate della camera rispetto alle coordinate di riferimento di punti di controllo.

3.2.9.2. Parametri di orientamento interno

- **Distanza focale:** distanza tra il centro dell'obiettivo (secondo punto nodale) e il piano focale. L'ampiezza del fascio di raggi è determinata dalla lunghezza focale, maggiore è la lunghezza focale maggiori saranno le dimensioni dell'immagine.
- **Punto di presa:** coincidente con il secondo punto nodale appartenente alla lente dell'obiettivo e punto di intersezione dei raggi proiettivi.
- **Punto principale:** intersezione dell'asse della camera con il piano focale.
- **Skew:** coefficiente di inclinazione che definisce l'angolo tra gli assi dell'immagine.

3.2.9.3. Parametri di distorsione

La distorsione si presenta di tipo **simmetrica radiale** e di tipo **asimmetrica tangenziale**.

Distorsione simmetrica radiale: corrisponde alla fonte di errore maggiore per la maggior parte delle camere da presa.

La distorsione non è costante ma aumenta in modo proporzionale: maggiore è la distanza tra il punto proiettato e il punto principale, maggiore sarà la distorsione.

La curva di distorsione viene definita con una serie polinomiale di Seidel con coefficienti di distorsione che vanno da $K_1, K_2 \dots K_n$.

$$\Delta r'_{rad} = K_1 r'^3 + K_2 r'^5 + K_3 r'^7 + \dots$$

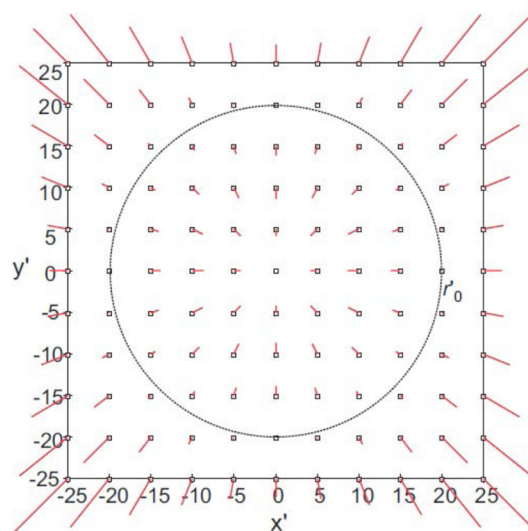


Figura 34 - Effetto della distorsione radiale simmetrica
Fonte: Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., (2006). Close
Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications.

Distorsione asimmetrica tangenziale: si verifica in base alla qualità delle lenti utilizzate ed è causata dal decentramento e il disallineamento dei singoli elementi che compongono l'obiettivo.

La distorsione tangenziale viene definita da coefficienti di distorsione tangenziale della lente P_1 e P_2 .

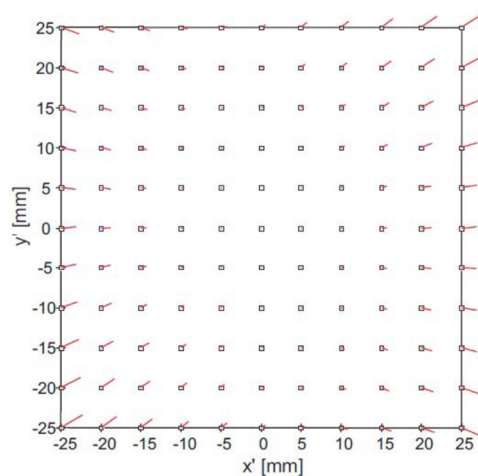


Figura 35 - Effetto della distorsione tangenziale
Fonte: Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., (2006). Close Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications.

Con l'evoluzione della fotogrammetria, le procedure di elaborazione dei dati sono cambiate ed evolute in risposta all'aumento della capacità di calcolo dei computer in grado di risolvere problemi di sempre più elevata complessità.

I processi di calibrazione delle camere e di orientamento delle immagini oggi vengono effettuate da procedure automatiche chiamate Structure From Motion (SfM).

3.3.Approcci SfM (Structure from Motion)

La Structure from Motion è un approccio di stima in grado di ricostruire attraverso software di calcolo, in modo automatico la geometria della scena, l'orientamento e la posizione della fotocamera. Grazie all'utilizzo di algoritmi di matching, della *computer vision*¹⁸, i sistemi SfM riconoscono i punti in legame delle immagini bidimensionali sovrapposte acquisite, costruendone una complessiva da cui ottenere la nuvola di punti e quindi generare la relativa geometria tridimensionale.

La tecnica Structure from Motion è una valida risorsa nell'applicazione della fotogrammetria per l'ottenimento di un modello tridimensionale, ma al fine di operare in modo corretto necessita durante la fase di rilievo l'acquisizione di un numero elevato di fotogrammi, questo perché più è alto il numero di fotografie più sarà facile per il software l'individuazione di punti in comune e di estrapolare maggiori informazioni.

A differenza di altre tecniche fotogrammetriche tradizionali, la SfM è una tecnica a basso costo che non richiede l'utilizzo di una macchina fotografica professionale calibrata, ma semplicemente fotocamere alla portata di tutti, di livello commerciale con una supervisione del fruitore minore a quelle richieste

¹⁸ La Computer vision è un ramo dell'intelligenza artificiale che addestra le macchine a estrarre informazioni da immagini digitali o video imitando tramite dati e algoritmi le funzioni dell'occhio umano.

Il settore dei Beni culturali supportato dalla Geomatica ne ha visto l'opportunità nell'applicazione per la digitalizzazione dell'ambiente e del costruito attraverso processi di machine learning nel rilievo fotogrammetrico.

Questa disciplina viene impiegata nel campo del rilievo fotogrammetrico, per l'analisi e la comprensione dei dati visivi acquisiti, nella prima fase di presa da una macchina fotografica, al fine di estrarre informazioni utili dai fotogrammi per la restituzione di una nuvola di punti.

per i metodi convenzionali. Negli ultimi anni, la tecnica SfM, tra le diverse applicazioni, viene sempre più impiegata nel campo del Reverse Engineering nell'ambito della fotogrammetria UAV.

3.4.Fasi principali dell'approccio SfM

Le principali fasi dell'approccio SfM per la ricostruzione di un modello tridimensionale sono:

- **Acquisizione delle immagini:** presa dei fotogrammi muovendosi attorno all'oggetto da rilevare e scattando un numero elevato di foto da più punti di vista differenti.
- **Features extraction e matching:** in questa fase mediante l'algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) vengono individuati i punti omologhi delle immagini acquisite ovvero i punti di interesse con caratteristiche comuni quali l'illuminazione, il colore, la rotazione.
Una volta estratti i punti in comune vengono accoppiati valutandone la somiglianza.
- **Orientamento delle immagini:** in questa fase vengono definiti i parametri della fotocamera utilizzata per l'acquisizione. Attraverso l'impiego della Geometria Epipolare e le relazioni dei punti omologhi già individuati si determinano i parametri di orientamento e posizionamento della camera limitando i possibili errori tramite il *bundle adjustment*. L'output sarà una nuvola rada di punti, costituita da un basso numero di punti necessari al software per l'orientamento del sistema. Inoltre, in questa fase il software

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Fasi principali dell'approccio SfM

riesce a riconoscere le distorsioni delle lenti e con un processo di autocalibrazione correggerle.

- **Dense matching:** in questa fase vengono estratte tutte le features comuni generando una nuvola di punti densa tramite l'esecuzione di algoritmi di Dense Image Matching. Dopo aver realizzato il modello denso di punti è possibile generare un ulteriore modello poligonale tramite una fase di *meshing* e di *texture mapping* riproiettando le fotografie acquisite sul modello ottenuto. Una volta generato, dal modello poligonale e texturizzato si possono estrarre ulteriori prodotti come profili di sezione e ortofoto.

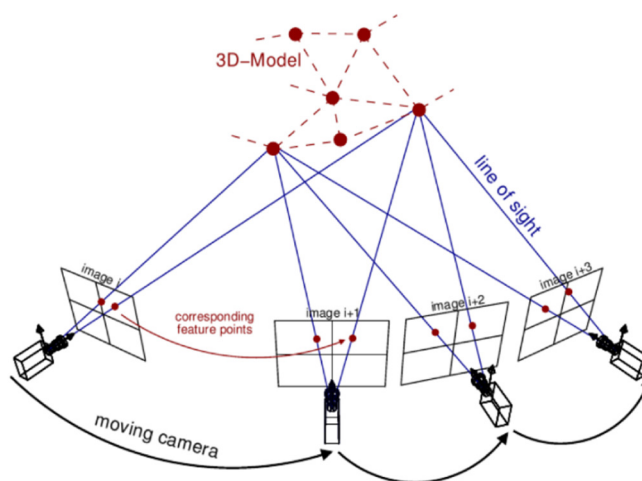


Figura 36 - Acquisizione di fotogrammi multipli in posizioni differenti
Fonte: A cura di Stefano FURLANI. SfM: Structure From Motion. Università

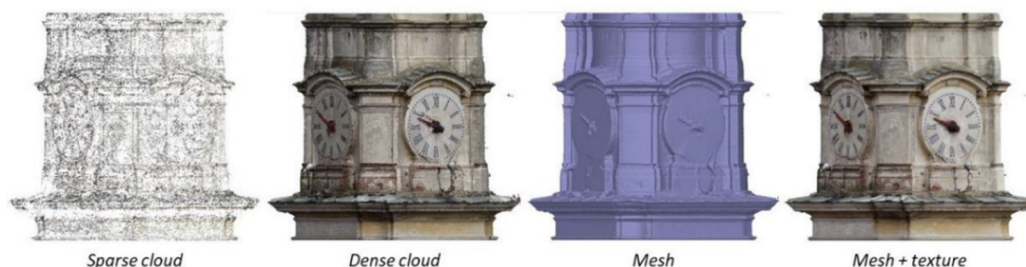


Figura 37 – Prodotti SfM, applicazione sul Campanile di Vittone

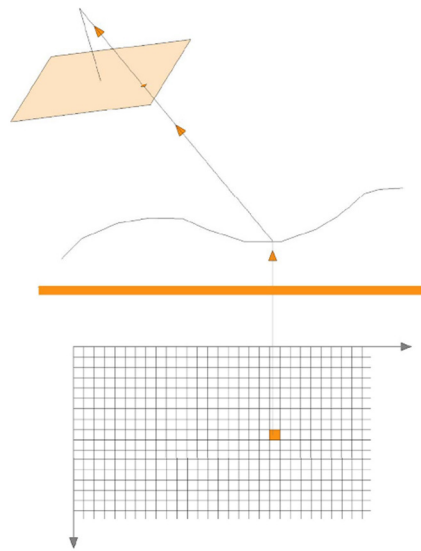
Fonte: Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2021). Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. *The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens.*, 13, 3633.

3.5. Prodotti

3.5.1.1. Ortofoto

L'ortofoto è un'immagine raster in grado di fornire informazioni metriche e fotografiche ottenuta da una proiezione ortogonale di un'immagine fotografica orientata e la conoscenza del modello DEM (Digital Elevation Model) dell'oggetto rilevato.

Ogni pixel del fotogramma orientato viene proiettato sul modello digitale definendo in questo modo le coordinate dei punti appartenenti all'oggetto che vengono a loro volta proiettati ortogonalmente su un piano su cui si costruirà l'ortofoto.



*Figura 38 - Ortoproiezione,
Fonte: Laboratorio di Geomatica per
l'ambiente e la conservazione dei beni
culturali (GECO)*

Per ogni pixel dell'ortofoto vengono calcolate le coordinate planimetriche XY dell'oggetto, la Z viene ricavata dal modello digitale.

Le coordinate XYZ ottenute sono retroproiettate sull'immagine originale orientata dalla quale si può leggere tramite interpolazione il valore radiometrico attribuito ad ogni pixel.

I metodi di interpolazione possono essere di tre tipi:

- ***Nearest neighbour***: o anche detto pixel replication è il metodo più semplice e veloce, la risoluzione radiometrica rappresentata dal valore DN (Digital Number) del pixel finale è pari al più vicino pixel noto del fotogramma originale
- ***Interpolazione lineare***: il valore radiometrico del pixel finale è ottenuto dalla media pesata dei quattro pixel più vicini del fotogramma originale
- ***Convoluzione cubica***: utilizza lo stesso principio dell'interpolazione lineare, il cui valore radiometrico del pixel finale è ottenuto dalla media pesata dei sedici pixel più vicini del fotogramma originale

3.6. Fotogrammetria UAV

La piattaforma UAV (Unmanned Aerial Vehicle) è un veicolo aereo senza equipaggio in grado di catturare immagini e video ad alta risoluzione telecomandato da remoto da un operatore che ne controlla le operazioni e visualizza il video e le acquisizioni in tempo reale.

Viene utilizzata all'interno della fotogrammetria aerea per rilevare dati attraverso acquisizioni effettuate da droni di parti di territorio e del settore edilizio per la creazione di un modello tridimensionale ottenuto da nuvole dense di punti.

I primi velivoli UAV furono creati per utilizzo militare con lo scopo di controllare e spiare aree sconosciute o nemiche. Nel campo della geomatica il suo primo utilizzo viene attribuito nel 1979 per un rilievo, da Przybilla e Western Ebbinghaus ¹⁹.

Oggi la sua applicazione si è estesa in ambiti civili ed in particolare nel settore del rilievo architettonico, archeologico e geologico/geomorfologico e può essere impiegata per:

- reperire dati di telerilevamento
- ottenere immagini ad alta risoluzione
- effettuare scansioni laser con tecniche Lidar
- rilevare fenomeni fisici
- effettuare riprese termografiche e radiometriche

Per effettuare un rilievo il drone è dotato di uno stabilizzatore per fotocamera a tre assi che neutralizza le vibrazioni e permette il movimento nelle tre dimensioni

¹⁹ Remondino, F., Nex, F., Sarazzi, D., (2011). Piattaforme UAV per applicazioni geomatiche, GEOmedia n.6.

XYZ, denominato *3-axis Brushless Camera Gimbal* (giunto cardanico a tre assi) (Figura 39).



Figura 39 - 3-axis Brushless Camera Gimbal

In base alla tipologia di rilievo che si vuole realizzare vengono montati sul drone diversi tipi di sensori di precisione che possono essere combinati fra di loro per un rilievo integrato.

I sensori montati su piattaforme UAV possono essere:

- **Sensori di posizione:** impiegati per la geolocalizzazione della piattaforma, possono essere IMU o GNSS a seconda del tipo di navigazione autonomo o manuale.
- **Sensori ottici:** impiegati per l'acquisizione di immagini nadirali o oblique per la documentazione e la mappatura di aree e/o edifici. Possono essere sensori compatti o camere digitali SLR, in base al payload (carico trasportabile) della piattaforma.
- **Sensori di rilevamento:** impiegati per il rilevamento diretto di informazioni tridimensionali. Possono essere sensori per strumenti LIDAR equipaggiati come payload.

Secondo l'UVS (Unmanned Vehicle Systems) International, le piattaforme UAV possono essere suddivise in base alle loro dimensioni, peso, quota e tempo di volo, payload e range massimo percorribile. In particolare, vengono classificate in tre categorie: UAV tattici, UAV strategici e UAV per scopi speciali ²⁰.

Nel settore civile vengono impiegati i velivoli tattici e in particolare per il rilievo fotogrammetrico la categoria dei Mini UAV, multirotori a più eliche, che permettono di acquisire riprese sia nadirali che inclinate.

L'acquisizione di dati fotografici mediante drone può essere suddivisa in quattro fasi:

- **Pianificazione delle prese aeree ed esecuzione delle strisciate del blocco:** il drone rileva l'area di interesse acquisendo una sequenza di fotogrammi lungo una linea a "zig zag". L'area da rilevare viene suddivisa in modelli stereoscopici in modo tale che ogni punto acquisito compaia almeno su due fotogrammi, garantendo una sovrapposizione tra i fotogrammi longitudinalmente del 80% e lateralmente di almeno il 70%. I fotogrammi acquisiti lungo uno stesso tracciato rettilineo costituiscono una strisciata. L'insieme di più strisciate è definito blocco di strisciate.
- **Orientamento dei fotogrammi acquisiti:** dopo aver terminato le operazioni di volo attraverso l'utilizzo di software SfM le immagini vengono in maniera automatica orientate.
- **Fase di controllo metrico:** in questa fase si effettua il controllo dei Ground Point Contro per verificare l'accuratezza del prodotto ottenuto.
- **Restituzione dei dati:** una volta orientare le immagini è possibile ottenere, attraverso tecniche di *dense image matching*, modelli tridimensionali in

²⁰ Remondino, F., Nex, F., Sarazzi, D., (2011). Piattaforme UAV per applicazioni geomatiche, GEOmedia n.6.

forma di nuvola di punti da cui estrarre modelli DTM, DSM, mesh e ortofoto.

L'operazione di presa del drone può avvenire in modalità automatica pre-impostando un percorso di volo pianificato attraverso i waypoint che il drone rileva come punti di riferimento per sorvolare l'area, oppure in modalità manuale, mediante un operatore che da terra controlla e comanda il volo in remoto.

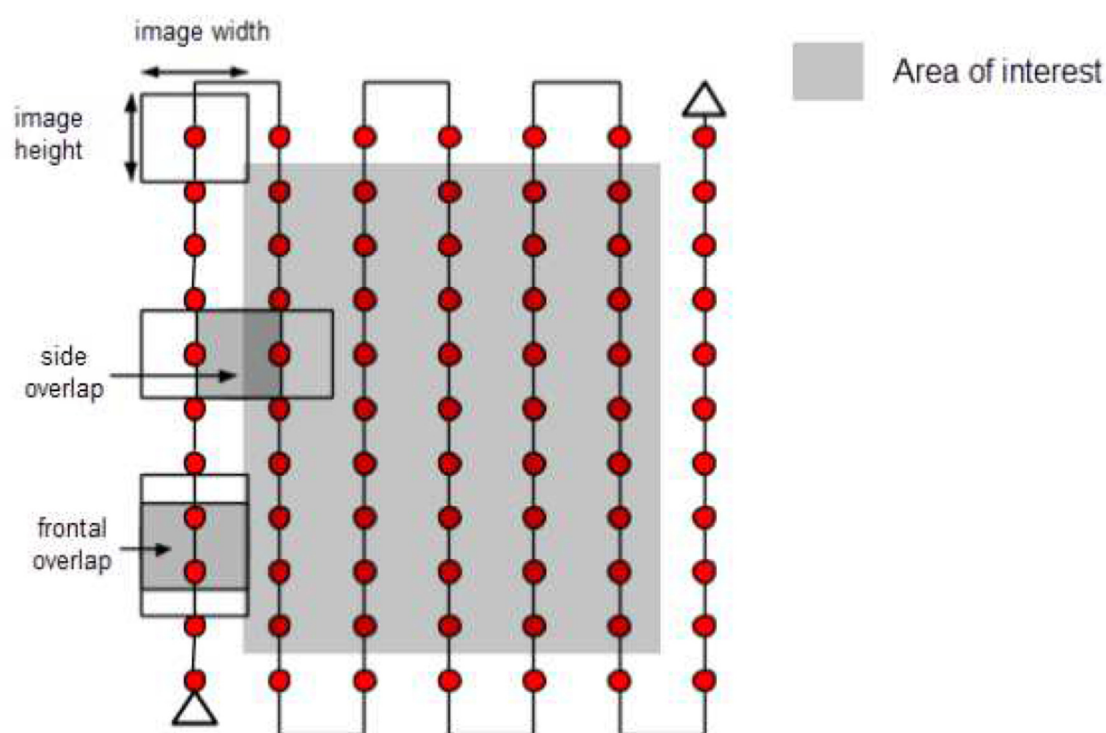


Figura 40 - Acquisizione fotogrammi

In generale i droni rappresentano un metodo innovativo per il rilievo con grandi vantaggi rispetto a satelliti o i veicoli tradizionali con equipaggio quali: la facilità di spostamento per ispezioni e rilievi in luoghi remoti o di difficile esplorazione, elevata precisione e velocità nell'acquisizione di dati e fotografie, la possibilità di

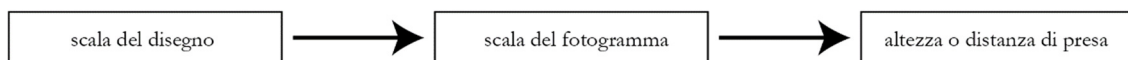
verificare in tempo reale le riprese. Dall'altra parte gli aspetti negativi sono l'autonomia di volo che è ancora molto ridotta e di conseguenza anche il campo di copertura su cui può agire.

3.6.1. Caratteristiche geometriche delle immagini

In ambito SfM l'accuratezza del prodotto finale è correlata alla qualità dei dati rilevati. È importante per una ricostruzione valida del modello tridimensionale dell'oggetto rilevato considerare alcune caratteristiche come ad esempio, la qualità dell'ottica, le condizioni di volo del drone, fenomeni atmosferici e di grandissima importanza la risoluzione spaziale dell'immagine definita dal Ground Sampling Distance (GSD)

In un rilievo fotogrammetrico è fondamentale conoscere in partenza la scala del modello che si vuole realizzare e relazionarla alla scala dei fotogrammi acquisiti.

Durante la pianificazione del rilievo sarà quindi necessario definire i seguenti passaggi illustrati nel grafico.



Ogni rilievo possiede una scala di restituzione specifica, sulla base di questa si definirà la scala dei fotogrammi e di conseguenza l'altezza di volo o la distanza di presa in base alla tipologia di rilievo da effettuare (aereo o terrestre).

La scala del fotogramma è calcolata sulla base delle geometrie interne della camera e alla distanza di presa. Note le dimensioni del sensore della camera e l'altezza di volo (nel caso di riprese aeree) o distanza di presa (nel caso di riprese terrestri) è possibile determinare la scala media di acquisizione sulla base di questa relazione:

$$\frac{p}{D} = \frac{l}{L} = \frac{1}{N}$$

Equazione 3. p è la distanza focale dell'obiettivo; D è la distanza media tra centro di presa (intersezione delle stelle proiettive) e l'oggetto; l è la dimensione maggiore del sensore; L è la corrispondente reale sul terreno

Con l'introduzione della fotogrammetria digitale, bisogna tener conto che acquisire immagini digitali significa acquisire matrici quadrate di punti (pixel)

bidimensionale. Nasce quindi la necessità di definire la risoluzione del pixel immagine sull'oggetto reale calcolando il GSD (Ground Sample Distance).

È importante definire inizialmente il valore di GSD da rispettare per definire poi l'altezza di volo o la distanza di presa e scegliere accuratamente i sensori da utilizzare.

Sulla base delle considerazioni precedenti è possibile relazionare

$$GSD = x: GSD = p: D = 1: N$$

$$GSD = D * \left(\frac{x}{p} \right)$$

Equazione 4. D è la distanza di presa o altezza; x è la dimensione del pixel espressa in mm (dipende dalle caratteristiche della fotocamera, ovvero dalla dimensione del sensore e dalla sua risoluzione); p è la distanza focale dell'obiettivo

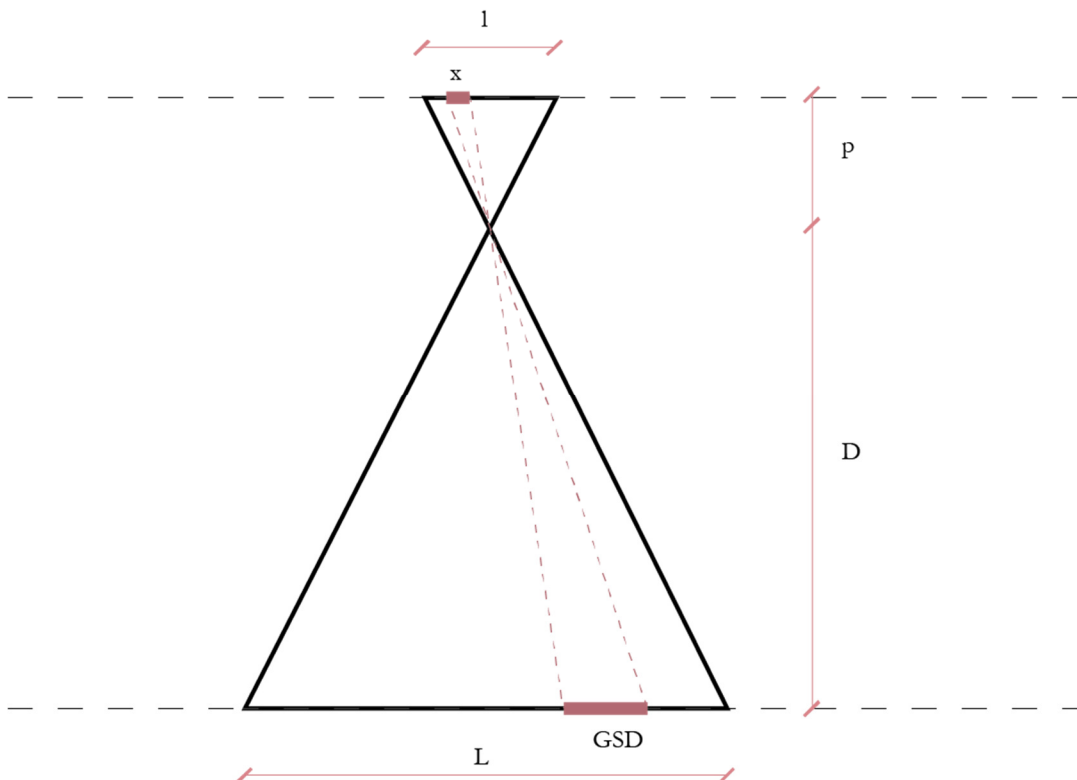


Figura 41 – Rappresentazione grafica del GSD

3.7.Tecniche Lidar

Il Light Detection and Ranging è una tecnologia di rilievo metrico di dettaglio che utilizza scansioni laser per il rilevamento e la mappatura ad alta risoluzione dell'ambiente e del patrimonio culturale, capace di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali sotto forma di nuvole di punti.

Il rilievo laser si basa sulla misurazione delle distanze attraverso le onde elettromagnetiche, e avviene per mezzo di un dispositivo sul quale è posto un sensore formato da un laser che è il trasmettitore, da un telescopio che si comporta da ricevitore e da un software capace di acquisire e gestire i dati.

La tecnica Lidar è nata alla fine degli anni 90 , e oggi giorno la sua applicazione si estesa in molteplici campi, sostituendo i metodi di rilevamento tradizionali data la sua facilità di eseguire misure in modo rapido e preciso.

L'impiego di questa tecnica ci permette di conoscere la posizione tridimensionale di punti, la loro distribuzione nello spazio e il valore della radianza riflessa.

L'utilizzo del laser scanner rileva in modo automatico lo spazio che circonda il dispositivo e restituisce una nuvola di punti, non-discretizzata e densa con la quale si può ricostruire in modo accurato e veloce un oggetto di qualsiasi forma e dimensioni.

I Laser scanner possono essere di tipo:

- ALS – *Airborne Laser Scanning*: il laser è posizionato al di sopra di un velivolo e viene diretto da terra. Di solito è impiegato per l'acquisizione di dati ad alta risoluzione per la generazione di una superficie digitale o di un modello digitale del terreno (DTM).
- TLS – *Terrestrial Laser Scanning*: il laser è posizionato su una postazione fissa o mobile, montato su un treppiede posto su terreno. Il rilievo avviene

nei dintorni dell'oggetto che si vuole rilevare ad una distanza che può variare da pochi centimetri a un chilometro.

3.7.1. Laser scanner terrestri

Esistono diverse tipologie di laser scanner oggi presenti sul mercato che variano in base al metodo di acquisizione, accuratezza, portata e velocità.

Principalmente si distinguono due classificazioni: i laser scanner distanziometrici e i laser scanner triangolari.

3.7.1.1. I laser scanner Triangolatori

I laser scanner triangolari sfruttano il metodo di triangolazione basata sulle proprietà geometriche dei triangoli per cui noto un cateto (a) e l'angolo opposto al cateto (α) è possibile conoscere il valore dell'altro cateto (b):

$$b = a * tg\alpha$$

Il laser genera un fascio di luce che si proietta sotto forma di punto luminoso sulla superficie dell'oggetto da rilevare.

Lateralmente al trasmettitore laser si posiziona un ricevitore come una macchina fotografica che riprende l'immagine riflessa del punto luminoso in modo che la posizione tra laser, fotocamera e centro di proiezione determini un triangolo.

In questo modo avendo nota la base, l'angolo α e la lunghezza focale si può determinare la distanza incognita e conoscere le coordinate spaziali del punto sull'oggetto.

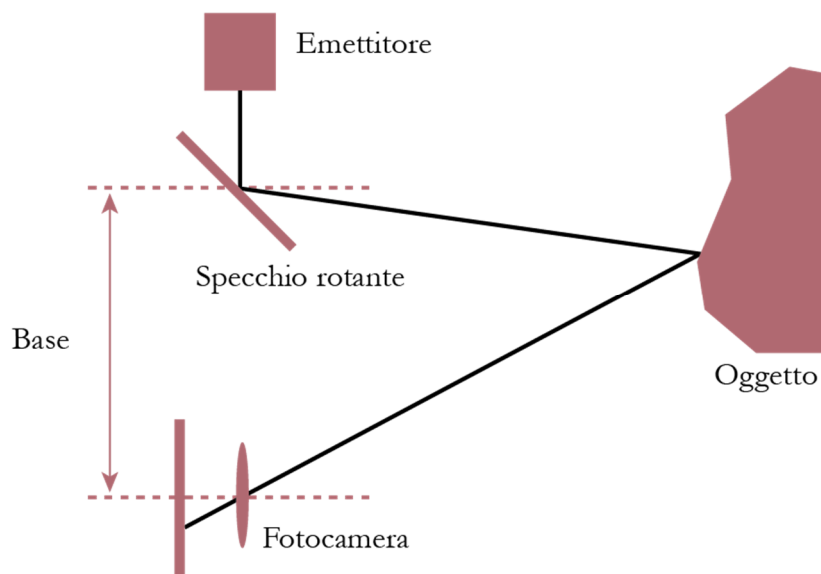


Figura 42 - Schema di acquisizione, Laser triangolatori - Rielaborazione immagine

Questo metodo di acquisizione permette di rilevare una copertura massima di qualche metro, distanze minori rispetto ai laser distanziometrici ma con una precisione più elevata dell'ordine di un millimetro.



Figura 43 - Laser scanner Triangolatore DOT DPI-8

3.7.1.2. Laser scanner Distanziometrici

I laser scanner distanziometrici possono essere assimilati a delle stazioni totali topografiche automatiche, per ogni punto si determinano le coordinate sferiche misurando l'angolo azimutale, l'angolo zenitale e una distanza inclinata tra il punto collimato e il centro dello strumento.

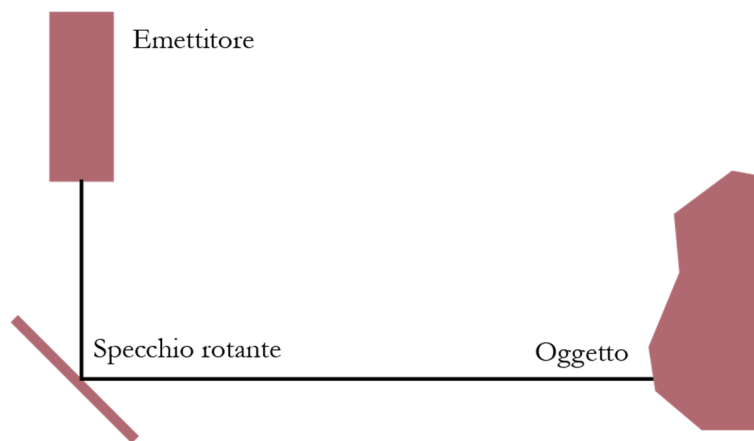


Figura 44 - Schema di acquisizione laser distanziometrici, rielaborazione immagine

A differenza di un sistema tradizionale il rilevamento tramite laser scanner avviene senza la possibilità di scegliere i punti da acquisire di un oggetto ma definendo solo la superficie su cui agire e la quantità di punti da rilevare. Dal rilievo otterremo una nuvola densa di punti di cui non si conosce la distribuzione.

I laser scanner distanziometrici oggi più utilizzati sul mercato sono quelli ad impulsi capaci rilevare distanze misurando il tempo Δt che un impulso luminoso impiega per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa. Questo tipo di sensore permette di misurare distanze massime di circa 800 metri, con un tempo di volo di circa 10000 pti/sec e con una precisione dell'ordine dei 5-10 mm.

I laser scanner distanziometrici in base al processo di misurazione vengono classificati in:

- **sistemi a misura diretta del tempo di volo:** la misurazione della distanza si basa sul calcolo del tempo che intercorre tra un impulso luminoso emesso verso un oggetto e l'impulso riflesso verso il ricevitore.

La distanza è definita dalla formula:

$$r = \frac{TOF \cdot c}{2}$$

Equazione 5. Dove r è la distanza tra il sensore e l'oggetto; T.O.F. è il tempo di volo (andata e ritorno) dell'impulso luminoso; C è la velocità della luce pari a 3×10^8 m/s.



Figura 45 - Laser Scanner RIEGL VZ-400i a tempo di volo

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Tecniche Lidar

- **sistemi a modulazione di fase:** il segnale emesso è un raggio laser continuo, con andamento sinusoidale, di frequenza nota. La misurazione avviene calcolando la differenza del tempo di fase tra il raggio emesso e quello ricevuto.



Figura 46 - Laser Scanner FARO S 350 a differenza di fase

3.8.Sistemi di mobile mapping terrestre

3.8.1. Algoritmi SLAM

Lo sviluppo tecnologico di strumenti sempre più complessi e ad alta precisione oggi consente di poter scegliere quale tecnologia adottare per effettuare un rilievo in base alle caratteristiche che il contesto possiede. Negli ultimi anni, per la digitalizzazione dei beni culturali sono di uso sempre più diffuso sistemi di mobile mapping (MMS), ovvero dispositivi portatili a scansione automatica che consentono di acquisire in modo rapido dati al fine di restituire una ricostruzione tridimensionale dell'ambiente o oggetto di rilievo.

In particolare, nel campo della Geomatica, i sistemi di mobile mapping, vengono impiegati nel rilievo architettonico outdoor e indoor, rivelandosi uno strumento flessibile, portatile, rapido e non distruttivo.

I sistemi più diffusi nel campo del rilievo architettonico sono basati sulla tecnologia SLAM (Simultaneous Localisation And Mapping) caratterizzata dall'impiego di tre componenti hardware: sensori ottici quali laser scanner e/o fotocamere digitali, sensori di navigazioni e posizionamento IMU e GNSS e un'unità di controllo e sincronizzazione.

La tecnica SLAM nasce all'interno dell'industria della robotica negli anni 1980 e 1990, come risoluzione di un duplice problema: consentire ai robot, parallelamente, il rilievo dell'ambiente e la auto localizzazione all'interno della mappa senza l'utilizzo del GPS. Per risolvere il problema la comunità robotica utilizzò la teoria delle probabilità per descrivere le relazioni geometriche tra i landmarks (punti di riferimento) e la posizione del robot.

Il robot o sensore (nel caso di rilievo architettonico), inizia a stimare la posizione di landmarks di forma sferica o cubica posti nell'ambiente con un certo dato di incertezza. Continuando il tragitto la sua incertezza aumenta e per ridurla

osserva nuovamente altri punti di riferimento e fa nuove osservazioni delle features che lo circondano, una volta completato l'ambiente ritorna indietro ripercorrendo e riosservando i landmarks e chiudendo il circuito riducendo in questo modo l'incertezza della posizione e dei dati rilevati. La posizione dei landmark e la posizione del sensore sono direttamente correlate, una è influenzata dall'altra (Figura 47-Figura 48-Figura 49).

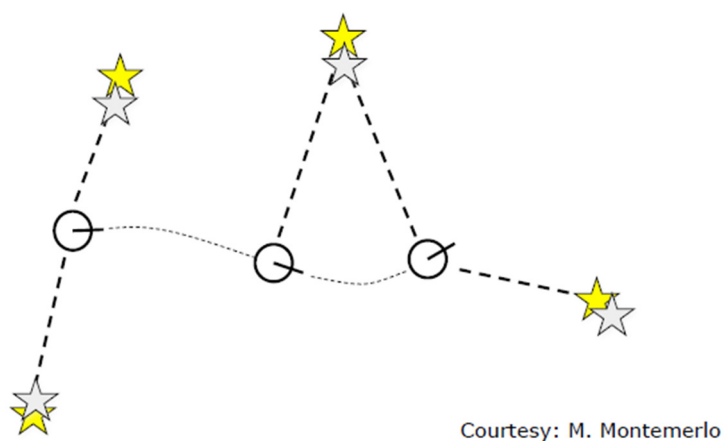


Figura 47 - Stima della posizione dei landmark utilizzando la posizione del sensore

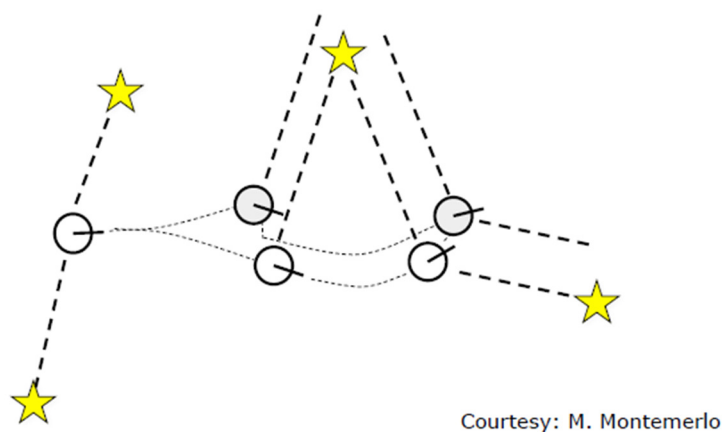


Figura 48 - Stima della posizione del sensore utilizzando dei landmarks

I metodi e tecniche del rilievo 3D - Sistemi di mobile mapping terrestre

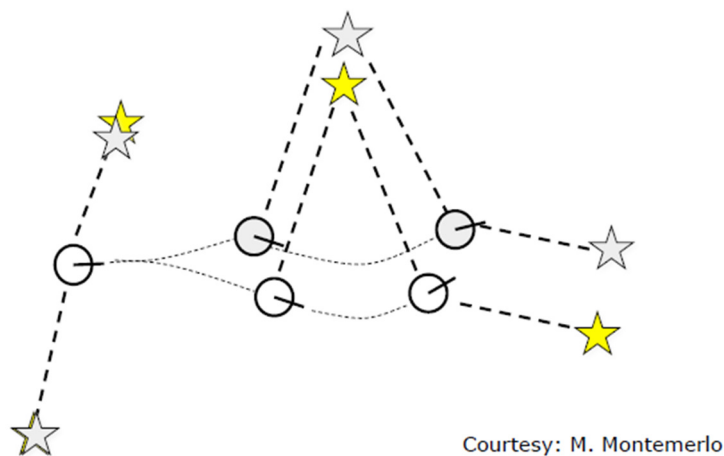


Figura 49 - Stima contemporaneamente della posizione del sensore e dei landmarks

Le applicazioni di sistemi basati su SLAM sono innumerevoli dal rilievo indoor, outdoor, aereo, subacqueo sia per veicoli con equipaggio che per veicoli autonomi, montate su carrelli o su zaini sulla base della tipologia di registrazione.

La caratteristica che rende questa tecnologia particolarmente interessante e innovativa è l'approccio multi-sensore e la capacità di acquisizione seamless, ovvero l'abilità di acquisire in modo continuativo in movimento il dato metrico, la posizione e l'orientamento in tempo reale andando a costruire le features dell'ambiente sotto forma di nuvola di punti. Gli algoritmi SLAM contribuiscono alla costruzione dell'ambiente 3D utilizzando i dati stimati dai sensori per definire la traiettoria di rilievo e altre caratteristiche come la velocità, la distanza e la posizione dal punto di presa.

Il risultato di un rilievo basato su SLAM dipende dalla tipologia di strumentazione che si adotta, dalla precisione e velocità dell'operatore durante la ripresa, dalle condizioni ambientali, dalla tipologia di features e dalla presenza di persone o ostacoli. Ad esempio, un ambiente ricco di geometrie favorirà il riconoscimento dei profili rispetto ad un ambiente con superfici lisce.

Un ambiente con persone in movimento o ostacoli contribuirà alla propagazione di errori, diffondendoli su tutta la registrazione della nuvola.

In generale, per una maggiore accuratezza dei dati e una riduzione di errori di deriva la traiettoria ottimale per questo genere di dispositivi è un circuito chiuso, da ripetere più volte al fine di ottimizzare il funzionamento degli algoritmi SLAM durante l'allineamento delle scansioni. Per tragitti lunghi è consigliabile dividere il circuito in blocchi più piccoli e ripetere più volte il percorso.

Un rilievo basato su SLAM spesso genera come output nuvole di punti rumorose ed è necessario applicare degli algoritmi di filtro e pulizia in una seconda fase di elaborazione, post rilievo.

Gli algoritmi possono essere automatici o semi-automatici e sono in grado di individuare le geometrie da eliminare secondo dei valori di soglie impostate o sulla base delle caratteristiche degli oggetti acquisiti.

Questa fase è importante per l'allineamento delle nuvole di punti acquisite, eliminando tutte le incoerenze visibili in ogni registrazione.

È da evidenziare infatti, che ogni nuvola generata si riferisce ad un sistema di riferimento dello strumento relativo al punto di partenza di acquisizione.

Ogni nuvola acquisita avrà quindi un sistema di riferimento diverso e per avere un'unica nuvola di punti è necessario allineare tutti i dati all'interno di un unico sistema di riferimento.

L'operazione di allineamento può avvenire secondo tre procedure:

- Orientamento con CMM (Coordinate Measurement Machine)
- Orientamento con riferimenti fissi sulla scena
- Orientamento con algoritmi ICP (Iterative Closest Point)

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile

4.1. Acquisizioni ed elaborazioni

Il rilievo del campanile è stato eseguito da un gruppo di ricerca del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (G4CH) del Politecnico di Torino, impiegando le tecniche affrontate nel capitolo precedente, quali range-based e image-based al fine di restituire un modello tridimensionale di punti. Da questo modello è stato poi possibile creare un secondo modello as-built in ambito H-BIM.

In particolare, sono state utilizzate tecniche topografiche, fotogrammetriche UAV, TLS e acquisizioni con sistemi SLAM.

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

Inizialmente è stato necessario costruire una rete topografica, predisponendo sull'area di rilievo alcuni vertici topografici con l'obiettivo di definire un unico sistema di riferimento cartesiano.



Figura 50 - Rete topografica

Fonte: Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2021). *Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens.*, 13, 3633.

Sono stati individuati cinque vertici nella parte frontale della torre e tre vertici interni disposti a livello intermedi. Il rilievo esterno è stato integrato costruendo una base topografica geolocalizzata all'interno di un sistema GNSS (Global Navigation Satellite System). A causa della scarsa visibilità satellitare ostacolata dalla vicinanza di edifici e della complessa conformazione urbanistica del sito sono stati rilevati solo due dei vertici esterni anche con ricevitori GNSS. È stato impiegato per il rilevamento il ricevitore Zenith35 con metodo di posizionamento relativo statico utilizzando come stazioni permanenti quelle di Crescentino Torino e Cuorgnè con sistema di riferimento WGS84-ETRF2000, elaborando successivamente le misure all'interno del software Leica Geo Office. Le coordinate ottenute sono state utilizzate

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

Per i restanti vertici è stata utilizzata la stazione totale Leica Viva MS, utilizzata anche per il rilievo di dettaglio, collimando 99 punti di controllo a terra: 67 punti esterni e 32 punti interni, al fine di supportare le successive fasi di elaborazione dei dati con un'accuratezza di rilievo centimetrica.



Figura 51 - Rilievo di dettaglio, collimazione dei punti esterni ed interni

Fonte: Fonte: Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2021). Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens., 13, 3633.

L'altezza ellissoidica h è stata convertita all'interno del software ConveRgo in quota ortometrica, mediante l'utilizzo di grigliati nazionali dell'IGM di tipo GK2 riferiti al modello locale del geoide ITALGEO2005.

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

Per la creazione di un modello denso di punti sono stati impiegati voli fotogrammetrici UAV con il drone DJI Phantom 4 Pro, acquisendo un totale di 543 immagini sia nadirali che oblique. Sono state effettuate due campagne di voli diverse, una generale sull'area di interesse e una di dettaglio sul campanile.

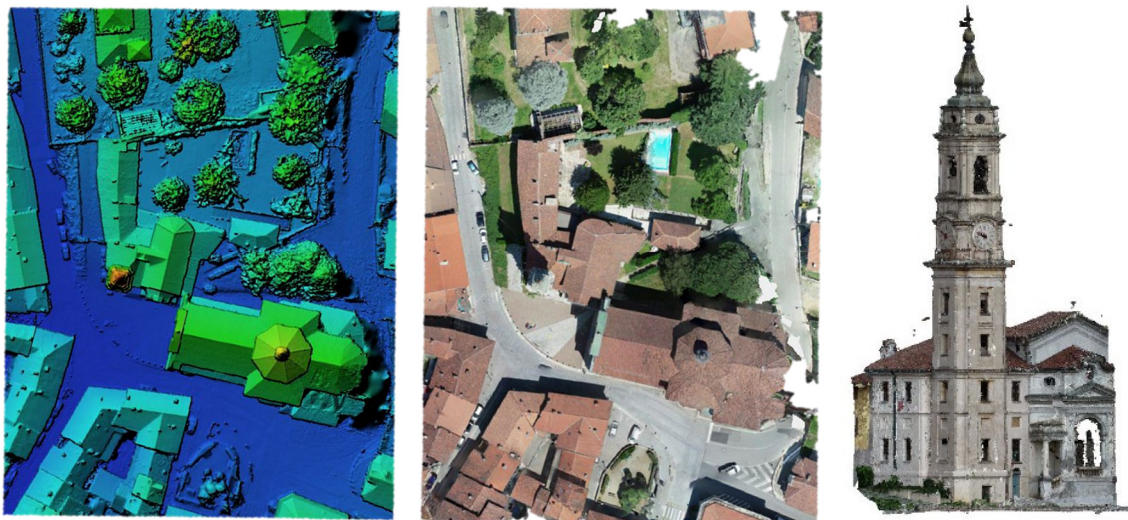


Figura 52 – Output del processo fotogrammetrico: ortofoto e nuvola di punti densa

Fonte: Teppati Losè, L.T., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F.G. (2021). Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens., 13, 3633.

Al fine di restituire un rilievo di dettaglio del campanile in scala 1:100 è stato pianificando uno schema di volo manuale, parallelo alla torre ad una distanza media di cinque-sei metri, ottenendo un GSD (Ground Sample Distance) di 0.3 cm/pix. Sono stati effettuati quattro voli, uno per ogni facciata, acquisendo le immagini partendo dal suolo fino alla cima della torre.

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

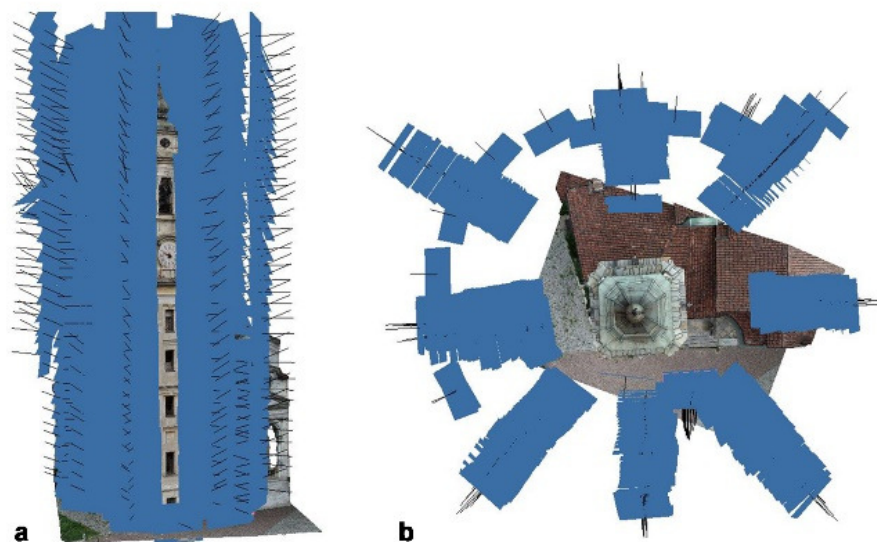


Figura 53 - Campagne di volo UAV

Fonte: Teppati Losè, L.T., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F.G. (2021). *Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens.*, 13, 3633.

Una volta acquisiti i fotogrammi, sono stati elaborati mediante un software SfM (Agisoft Metashape).

Tramite algoritmi sono stati identificati i punti in comune (matching) dei fotogrammi e individuata la posizione e l'orientamento della camera al momento della presa limitando i possibili errori con il Bundle Block Adjustment. Dopo aver orientato i fotogrammi e ricostruito la scena del rilievo, sono stati inseriti i punti di controllo (GCP e CP) e identificati nelle immagini al fine di effettuare il controllo metrico degli errori e del processo fotogrammetrico.

Successivamente attraverso algoritmi di dense image sono stati generati modelli tridimensionali ad alta risoluzione ($\approx 56.000.000$ punti) e DSM da cui poter estrarre ortofoto e informazioni metriche.

4.1.1. Zeb Revo RT

Per il rilievo interno del campanile è stato utilizzato il sistema di mappatura mobile Zeb Revo RT di GeoSLAM. Lo strumento è costituito da una testa mobile sui cui è montato un profilometro laser scanner 2D ad infrarossi, che permette di acquisire i profili di punti 2D ed è generalmente associato ad un sensore IMU (Inertial Movement Unit), un sistema di navigazione che consente di tracciare il percorso effettuato dall'operatore attraverso l'utilizzo di giroscopi triassiali, accelerometri e magnetometri a tre assi che calcolano in tempo reale le accelerazioni lineari e angolari.



Figura 54 - Zeb Revo RT di GeoSlam

Questo strumento ha la capacità di ruotare in modo automatico su un asse, effettuando in tutte le direzioni scansioni dell'ambiente circostante seguendo la traiettoria dell'operatore e rilevando 43.200 punti al secondo. I sistemi Lidar basati su SLAM sono dotati di una telecamera che effettua scansioni in sequenza e creando una traiettoria sui cui traccia i punti per determinare le coordinate della fotocamera e ricostruire la scena d'ambiente in una nuvola di punti.

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

I dati acquisiti dal profilometro vengono allineati durante il rilievo utilizzando gli algoritmi SLAM e generando la nuvola di punti tridimensionale.

Lo scanner mobile è collegato in remoto tramite connessione wi-fi specifica con un tablet che visualizza in tempo reale l'acquisizione, inviando i dati dei profili 2D e la traiettoria percorsa.

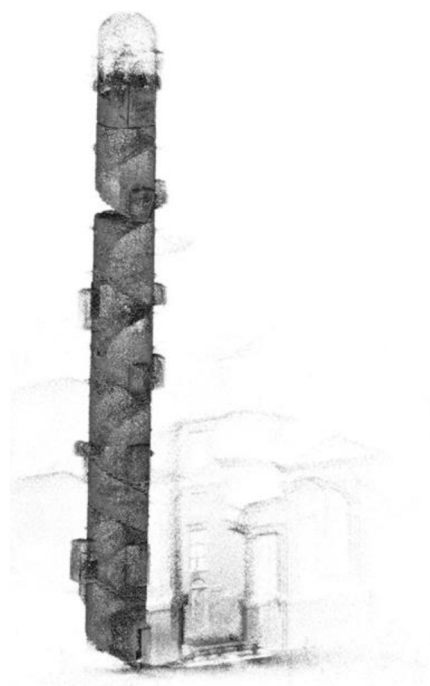


Figura 55 - Nuvola interna

Fonte: Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2021). Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. Remote. Sens., 13, 3633.

Per il rilievo interno del campanile il percorso di mappatura mobile è stato effettuato quattro volte creando un circuito chiuso. Successivamente le nuvole sono state allineate manualmente e unite con la funzione “merge” in un unico sistema di riferimento locale, utilizzando la piattaforma GeoSlam, l'algoritmo poi in fase di reprocessing ha implementato i dati SLAM con quelli IMU, restituendo una nuvola di punti più accurata basata sulle scansioni sovrapposte.

Il rilievo metrico 3D e la modellazione del Campanile - Acquisizioni ed elaborazioni

Ad integrazione del rilievo sono state effettuate complessivamente undici scansioni laser scanner terrestri (TLS) esterne e sette interne, utilizzando un Faro Focus3D X330 (laser di classe 1, misura 976000 punti al secondo), acquisite in due campagne di acquisizione diverse.

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software Faro Scene. Le scansioni dei punti interni sono state utilizzate come sistema di riferimento per georeferenziare la nuvola SLAM e verificarne l'accuratezza globale. Tramite l'algoritmo iterativo Closest Point (ICP) è stata eseguita la registrazione della nuvola dei punti UAV con quella SLAM all'interno del software Cloud Compare con un errore quadratico medio di circa quattro cm.

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM

5.1.BIM: building information modelling

Con l'acronimo BIM (Building Information Modelling) si indica il processo di creazione di un modello virtuale digitale all'interno del quale ogni elemento è catalogato e ha associato una o più informazioni o parametri che lo descrivono.

Il BIM nasce negli anni 2000 come sviluppo e miglioramento della tecnologia CAD e negli ultimi dieci anni il suo sviluppo ha trasformato il settore delle costruzioni a livello globale, diffondendosi sempre di più e rivoluzionando la gestione e l'organizzazione del progetto, la condivisione di dati ed informazioni.

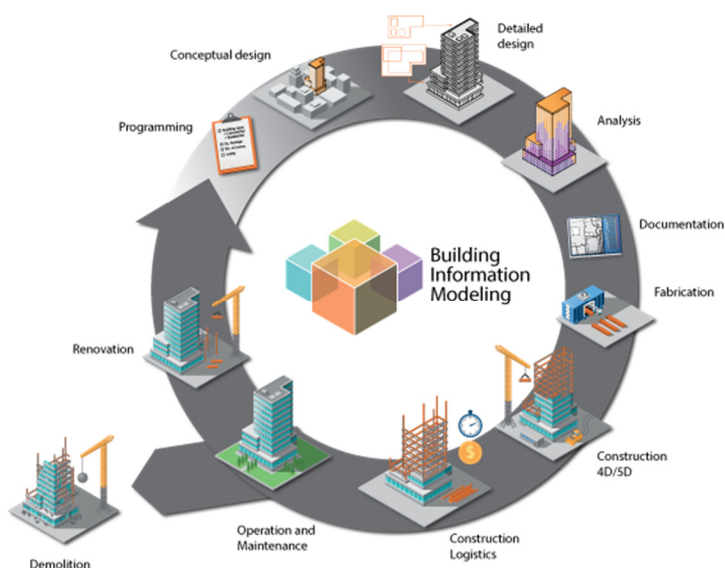


Figura 56 – BIM

Fonte: <https://www.buildingincloud.net/gestione/guida-ai-software-bim/>

L'approccio BIM permette di realizzare in modo più efficiente obiettivi a team di figure professionali che cooperano, minimizzando i costi, i tempi e gli errori di costruzione e progettazione, che in un tradizionale metodo di lavoro si verificano spesso per problemi di comunicazione e coordinamento del progetto. È possibile, inoltre gestire le fasi di pianificazione, progettazione e costruzione, monitorando il ciclo di vita utile dell'oggetto modellato.

All'interno del progetto BIM, ogni elemento è modellato all'interno di un unico database, è visualizzabile in più viste bidimensionali o tridimensionali ed è interrogabile in ogni punto restituendo informazioni di qualsiasi tipo: strutturali, fisici, materici, etc.

5.1.1. CAD e BIM: le differenze

I software CAD nascono per il disegno tecnico bidimensionale e per la rappresentazione di muri, finestre, porte è necessario tracciare una quantità elevata di linee e polilinee.

Ogni elaborato grafico quale pianta, prospetto, sezione o assonometria è disegnato singolarmente. A differenza dei software CAD, il BIM può invece descrivere gli oggetti creati e classificarli fornendo delle informazioni su specifici oggetti "smart".

Gli oggetti in ambito BIM sono dei particolari componenti standardizzati chiamati famiglie, come muri, finestre, porte che, in base all'esigenza del progetto vengono modificate.

Una volta creato un elemento in una delle viste questo comparirà in tutte le altre in modo automatico e se si effettueranno delle eventuali modifiche il modello verrà aggiornato contemporaneamente in ognuna delle viste. Questa funzione permette di risparmiare tempo e ridurre possibili errori. Inoltre, oltre alle viste di

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - BIM: building information modelling

pianta, prospetto e sezione, in tempo reale è visualizzabile il modello 3D che consente di verificare ulteriormente se vi sono interferenze tra i singoli elementi.

Con la tecnologia BIM si può scegliere il livello di dettaglio di rappresentazione da un unico progetto, associando ad ogni vista un livello di dettaglio che può essere basso, medio o elevato, a differenza dei software CAD, dove in base alla scala di dettaglio è necessario creare disegni diversi.

Inoltre, un modello 3D creato su piattaforma BIM può essere condiviso in cloud con più collaboratori che possono lavorare in tempo reale.

5.1.2. Le dimensioni del BIM

Secondo la normativa italiana UNI 11337 il BIM possiede sette dimensioni di progetto, introducendo oltre a quella bidimensionale e tridimensionale:

- **4D: gestione dei tempi**
- **5D: gestione dei costi**
- **6D: sostenibilità**
- **7D: analisi energetica**



Figura 57 - Le dimensioni del BIM

Fonte: <https://biblus.acca.it/focus/le-7-dimensioni-del-bim/>

5.1.2.1. 4D: gestione dei tempi

La quarta dimensione rappresenta graficamente la vita dell'edificio durante le fasi di progettazione e costruzione. All'interno di software BIM vengono associati attraverso dei filtri di fase, gli elementi in base allo stato di fatto di fase: nuovo, esistente, demolizione. All'interno delle viste possono essere visualizzate le diverse fasi di vita dell'edificio e confrontare per esempio la situazione di fatto con la situazione di progetto sia sui livelli bidimensionali che tridimensionali.

5.1.2.2. 5D: gestione dei costi

La quinta dimensione viene utilizzata per l'analisi dei dati e la stima e valutazione dei costi. Tramite software BIM è possibile ottenere un computo in maniera automatica, che varia in tempo reale in base alle variazioni che si apportano al progetto. Per ottenere una stima dei costi, il software quantifica i materiali necessari alla costruzione, in base alla superficie o volume necessari, direttamente dal modello realizzato. In questo modo è possibile avere un controllo delle spese in tempo reale delle idee progettuali e valutarne la fattibilità economica.

5.1.2.3. 6D: Facility management

L'IFMA (International Facility Management Association) definisce il Facility Management come "la disciplina aziendale che coordina lo spazio fisico di lavoro con le risorse umane e l'attività propria dell'azienda. Integra i principi della gestione economica e finanziaria d'azienda, dell'architettura e delle scienze comportamentali e ingegneristiche".

La sesta dimensione rappresenta la gestione e la manutenzione degli impianti e dei servizi durante tutto il ciclo di vita dell'edificio.

Il facility management sono tutte quelle attività di gestione, che non producono un guadagno diretto, ma hanno come fine il miglioramento della qualità e dell'efficienza, durante tutto il ciclo di vita, dell'edificio.

Esse comprendono:

- la gestione e ottimizzazione delle voci di costo delle fasi progettuali e costruttive
- il supporto alle attività dell'azienda
- il soddisfacimento delle richieste e dei bisogni della committenza
- l'ottimizzazione e l'organizzazione degli spazi, dei servizi e del suo funzionamento nel tempo
- la manutenzione nel tempo del patrimonio costruito

5.1.2.4. 7D: analisi energetica

La settima dimensione è impiegata nei software BIM per la quantificazione dei consumi energetici. Gli oggetti modellati all'interno del modello BIM possiedono caratteristiche termodinamiche con cui è possibile determinare delle stime energetiche in modo accurato durante tutte le fasi di progettazione dal modello tridimensionale ottenuto. In questo modo è possibile sviluppare progetti sostenibili, migliorare le prestazioni riducendo i consumi energetici.

5.1.3. Interoperabilità

Il BIM fornisce un metodo di lavoro collaborativo, con la possibilità di condividere il file di modello o più file di modello a diversi ruoli professionali che si occupano di ambiti differenti (architetti, ingegneri, etc.).

La cooperazione tra le varie figure professionali si manifesta tramite lo scambio di dati in un formato di file comune denominato IFC.

L'IFC (Industry Foundation Class) è un formato open e neutrale, sviluppato da un consorzio industriale nel 1994 da Autodesk che nel 1997 è stato rinominato "International Alliance for Interoperability" come organizzazione no profit. L'obiettivo dell'associazione fu quello di sviluppare un modello di dati che avrebbe dovuto raccogliere le informazioni di un edificio per tutto il suo ciclo di vita.

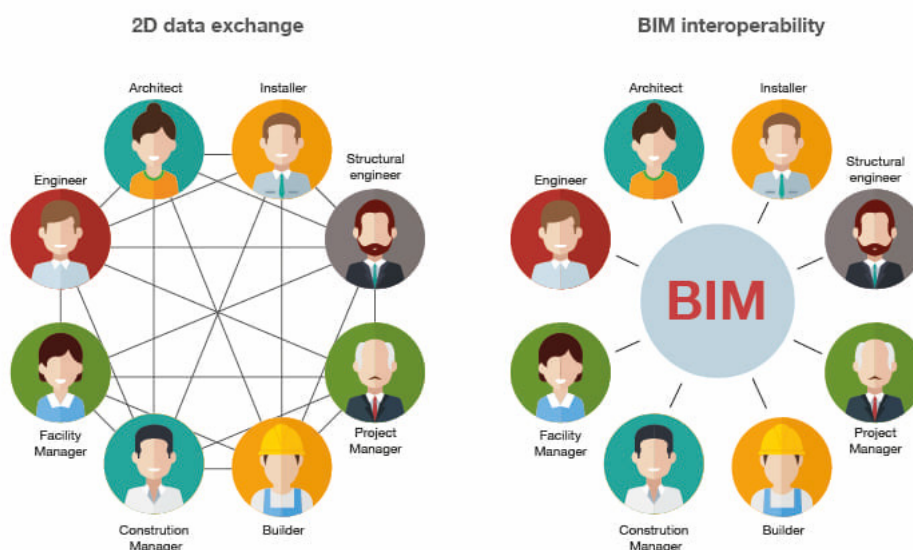


Figura 58 - Interoperabilità

Fonte: <https://www.acca.it/software-bim>

Il flusso di informazioni è fondamentale nel processo BIM per l'interoperabilità tra i diversi software di analisi, calcoli strutturali, di progettazione e costruzione. Questo formato consente di trasferire le informazioni tra le diverse applicazioni e software mantenendo invariate le informazioni geometriche e le relazioni tra i vari componenti.

In questo modo si potrà godere di più benefici quali una riduzione dei tempi e di errori, i professionisti di ogni settore, infatti, potranno usufruire di un modello interdisciplinare, comune, senza doverlo riprogettare più volte.

5.1.4. Benefici

Come illustrato nella curva di Mac Leamy, il processo BIM richiede di convogliare le energie verso le prime fasi preliminari di progetto, dove è possibile effettuare variazioni, modificare decisioni e considerare le variazioni di costo sulla base dei materiali e delle caratteristiche di design scelte.

Lo sforzo progettuale iniziale influenzerà positivamente la fase costruttiva in termini di riduzione di costi, anticipando le decisioni rispetto ad un tradizionale metodo di lavoro.

Un modello virtuale, infatti, consente di verificare il progetto prima di costruirlo fisicamente, il processo di costruzione sarà all'interno di un ambiente virtuale e l'appaltatore o il cliente potrà decidere se effettuare delle modifiche senza costi aggiuntivi.

Ad esempio, una modifica di un muro in fase di costruzione, come spesso avviene nelle procedure tradizionali nel settore dell'edilizia, è un'operazione costosa. Con il metodo BIM la modifica si effettuerebbe virtualmente spostando l'oggetto all'interno del modello.

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - BIM: building information modelling

Tramite una visualizzazione tridimensionale il professionista del mestiere riesce a trasmettere in modo efficace l'idea progettuale al cliente e a soddisfare le eventuali richieste. Inoltre, avere a disposizione un modello 3D oltre ad una documentazione 2D, è utile agli operatori, per una migliore visualizzazione degli elementi da costruire in cantiere.

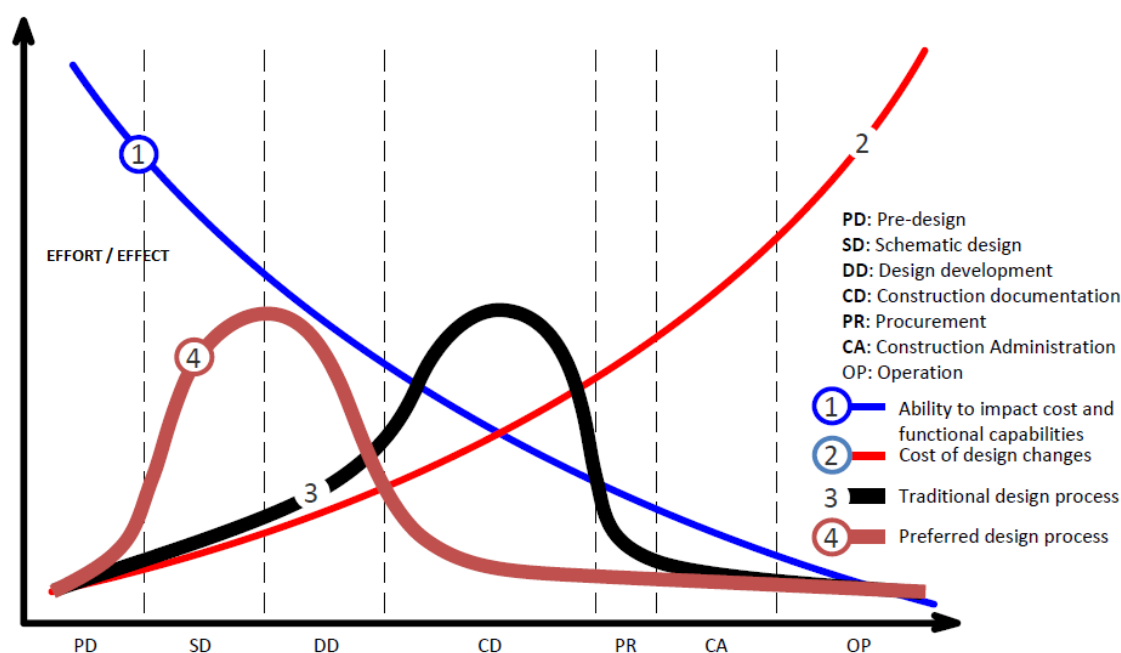


Figura 59 - Curva di MacLeamy

In generale, applicato alle fasi che accompagnano un progetto, il BIM rivela numerosi vantaggi rispetto ad un tradizionale metodo progettuale.

Di seguito si riportano i principali benefici:

- Produzione di più tavole in minor tempo e con una riduzione di errori
- Tempi di costruzione ridotti
- Documentazione dell'edificio per tutto il ciclo di vita
- Monitoraggio e manutenzione dell'edificio
- Maggior efficienza in cantiere

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - BIM: building information modelling

- Possibilità di effettuare analisi
- Quantificazione dei materiali
- Analisi dei costi
- Migliore visualizzazione del progetto (2D e 3D o VR)
- Sviluppo di progetti applicati alla prefabbricazione e industria 4.0

5.1.5. Limiti

Uno dei limiti principale del BIM attualmente è la sua integrazione all'interno di un processo aziendale tradizionale e consolidato. Il BIM per le aziende del settore edilizio rappresenta un investimento iniziale, che comporta l'acquisto di nuovi software e la formazione attraverso corsi professionali per la definizione di ruoli specifici del processo BIM (BIM manager, BIM specialist etc.), costi e rischi che non tutte le aziende sono disposte a correre.

Inoltre, la gestione dei dati, l'organizzazione dei flussi di lavoro e la necessità di cooperare in un team interdisciplinare rende la progettazione più complessa e rigorosa e totalmente differente dal metodo di lavoro tradizionale che persiste da secoli.

5.1.6. Componenti edilizi

I modelli BIM sono modelli informativi costituiti da componenti che possiedono caratteristiche geometriche, fisiche e funzionali. Ogni elemento è in relazione con un altro o è ospitato in uno spazio ideato solo per quel particolare elemento.

Ogni oggetto contiene delle informazioni che possono essere grafiche o no, e variare in base all'esigenza e alla tipologia di analisi che si vuole eseguire.

Per la restituzione digitale del Campanile è stato utilizzato il software di modellazione parametrica BIM Revit sviluppato da Autodesk nel 2002.

Revit è un programma CAD e BIM (Building Information Modelling) in grado di creare modelli intelligenti di complessi architettonici.

Nella realizzazione di un progetto, Revit utilizza tre tipologie di elementi:

- **Elementi di modello:** rappresentano le geometrie tridimensionali dell'edificio e possono essere come per esempio muri, pavimenti, soffitti e tetti o componenti da modello come le finestre le porte e gli arredi.
- **Elementi di riferimento:** sono gli elementi che aiutano il progettista alla costruzione del progetto come, per esempio, i livelli di visualizzazione e i piani di riferimento.
- **Elementi di vista:** all'interno di questa categoria fanno parte tutti gli elementi di dettaglio 2D e gli elementi di annotazione.

Gli elementi all'interno di un progetto Revit vengono classificati secondo una gerarchia:

- **Categorie:** sono gruppi di elementi utilizzati per la documentazione del progetto o per realizzazione di modelli

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - BIM: building information modelling

- **Famiglie:** per ogni categoria vi sono delle famiglie di elementi che hanno dei parametri condivisi, possono presentare valori diversi per alcune caratteristiche ma fare parte dello stesso gruppo.
- **Tipi:** una famiglia può contenere più tipi, ad esempio uno stesso elemento può avere dimensioni diverse ma fare parte della stessa famiglia.

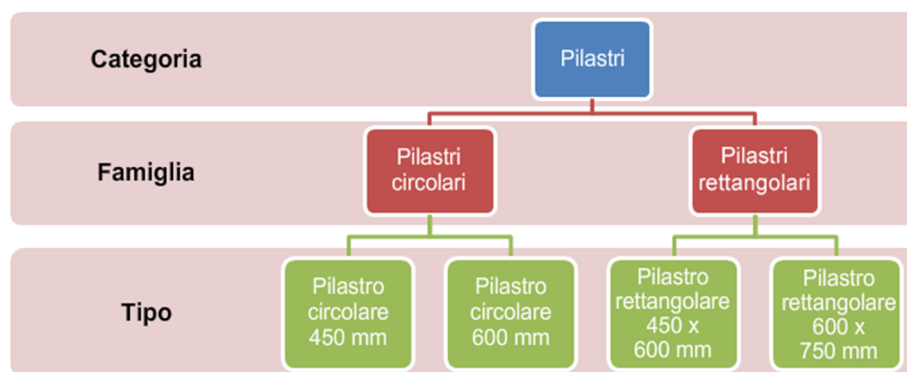


Figura 60 - Gerarchia degli elementi in Revit

Le famiglie a loro volta sono suddivisibili in:

- **Famiglie di sistema:** non possono essere caricate, sono all'interno del software e costituiscono una base, possono essere modificate facendone una copia delle originali e cambiandone i parametri.
- **Famiglie caricabili:** sono famiglie generate esternamente dal modello personalizzate con le quali è possibile inserire un elevato numero di parametri e caratteristiche. Una volta realizzate possono essere caricate e aggiunte in uno o più progetti.
- **Famiglie locali:** sono famiglie personalizzate ma a differenza di quelle caricabili sono modellate nel progetto e si riferiscono unicamente al progetto nel quale vengono create.

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - BIM: building information modelling

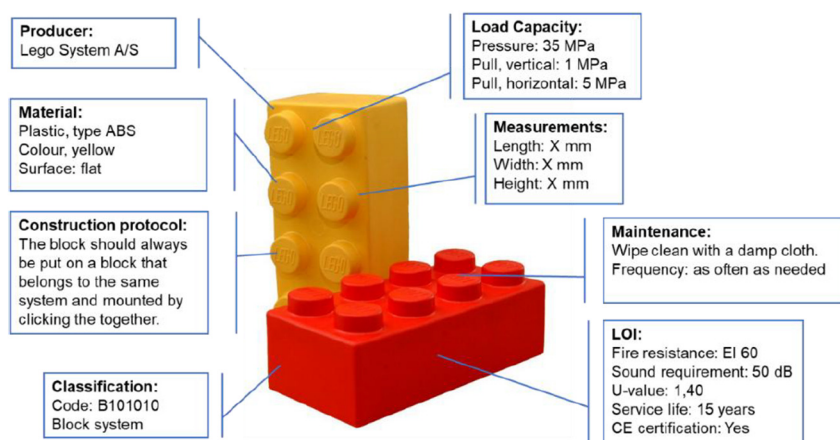


Figura 61 - Esempio di oggetto intelligente

5.2.L'H-BIM

Il termine HBIM (Historical o Heritage Building Information Modelling) compare per la prima volta in un articolo scientifico del 2009, coniato dal professore Maurice Murphy e dai suoi colleghi del Dublin Institute of Technology.

All'interno dell'articolo l'HBIM viene introdotto come nuovo sistema di modellazione, che a partire da una nuvola di punti, viene applicato a complessi storici, al fine di una restituzione digitale di modelli smart tridimensionali contenenti dati storici e informazioni sulle tecniche costruttive.

La sua applicazione in Italia è ancora poco diffusa, ma rappresenta una grande risorsa che può essere impiegata per una ricostruzione digitale al fine di un recupero di edifici esistenti ad alto valore storico e alla valorizzazione degli stessi.

5.2.1. Obiettivi H-BIM

Gli obiettivi principali della metodologia HBIM sono

- la documentazione dello stato di fatto degli edifici di valore storico
- la gestione e manutenzione del patrimonio costruito

5.2.2. Le fasi

Il processo HBIM si divide in quattro fasi:

- raccolta e studio dei dati storici
- raccolta dei dati di rilievo
- creazione di un modello 2D e 3D parametrico
- arricchimento del modello con i dati storici e progettuali raccolti

5.2.2.1. Fase 1

In questa fase è necessario acquisire più informazioni possibili, storiche e archivistiche sull'edificio, in modo da creare una base su cui poter lavorare successivamente e pianificare eventuali interventi di recupero e valorizzazione. È importante svolgere un'indagine storica sul manufatto storico, per indagare le forme geometriche e i materiali impiegati per la sua realizzazione e lo stato di degrado.

Inoltre, in questa fase preliminare viene definito il livello di Sviluppo (LOD) che comprende il livello di dettaglio (LoD) e il livello di informazione (LoI).

I LOD hanno la funzione di definire con precisione il livello di approfondimento degli elementi da modellare e delle informazioni da inserire.

Di seguito si riportano le definizioni dei livelli di LOD per il patrimonio esistente tratti dalla norma UNI 11337/4.

LOD A

«Le entità sono rappresentate graficamente attraverso un sistema geometrico simbolico od una raffigurazione di genere presa a riferimento senza vincolo di

geometria. Le caratteristiche quantitative e qualitative (prestazione, dimensione, forma, ubicazione, costo, ecc.) sono indicative.»

LOD B

«Le entità sono virtualizzate graficamente come un sistema geometrico generico o una geometria d'ingombro. Le caratteristiche quantitative e qualitative (prestazioni, dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono approssimate.»

LOD C

«Le entità sono virtualizzate graficamente come un sistema geometrico definito. Le caratteristiche quantitative e qualitative (prestazioni, dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono definite in via generica entro e nel rispetto dei limiti della legislazione vigente e delle norme tecniche di riferimento e riferibili ad una pluralità di entità similari.»

LOD D

«Le entità sono virtualizzate graficamente come un sistema geometrico dettagliato. Le caratteristiche quantitative e qualitative (prestazioni, dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono specifiche di una pluralità definita di prodotti similari.

È definita l'interfaccia con altri sistemi specifici di costruzione, compresi gli ingombri approssimati di manovra e manutenzione.»

LOD E

«Le entità sono virtualizzate graficamente come uno specifico sistema geometrico specifico. Le caratteristiche quantitative e qualitative (prestazioni, dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono specifiche di un singolo sistema produttivo legato al prodotto definito. È definito il dettaglio relativo alla fabbricazione, l'assemblaggio e all'installazione, compresi gli specifici ingombri di manovra e manutenzione.»

LOD F

«Gli oggetti esprimono la virtualizzazione verificata sul luogo dello specifico sistema produttivo eseguito/costruito (as-built). Le caratteristiche quantitative e qualitative (dimensione, forma, ubicazione, orientamento, costo, ecc.) sono quelle specifiche del singolo sistema produttivo del prodotto posato o installato. Sono definiti per ogni singolo prodotto gli interventi di gestione, manutenzione e/o riparazione e sostituzione da eseguirsi lungo tutto il ciclo di vita dell'opera.»

LOD G

«Gli oggetti esprimono la virtualizzazione aggiornata dello stato di fatto di una entità in un tempo definito. Rappresentazione storicizzata dello scorrere della vita utile di uno specifico sistema produttivo aggiornato rispetto a quanto originariamente eseguito/costruito o installato. Le caratteristiche quantitative e qualitative (dimensione, forma, ubicazione, orientamento, ecc.) sono aggiornate rispetto al ciclo di vita ed un precedente stato di fatto. È annotato ogni singolo (e significativo) intervento di gestione, manutenzione e la riparazione e sostituzione eseguito nel tempo, così come è registrato il livello di degrado eventualmente in essere.»

Dalla nuvola dei punti al modello HBIM - L'H-BIM

Per edifici storici si parla di livello di dettaglio “as-built” e “as-damaged” nel caso abbia subito nel tempo fenomeni di degrado.

In particolare, la UNI 11337-4:2017 definisce per un progetto di recupero o restauro di un edificio esistente un livello di dettaglio LOD F.

Un altro parametro viene definito quando si parla di modelli HBIM ovvero il livello di accuratezza (LoA).

La maggior parte degli edifici esistenti presenta delle murature spesso inclinate, in pendenza o con superfici curvate ed è difficile creare un modello che sia esattamente la copia della realtà. L'obiettivo è quello di realizzare un modello che si avvicini all'edificio esistente con un'accuratezza elevata.

Il livello di accuratezza viene calcolato misurando la deviazione tra il modello creato e la nuvola di punti acquisita, questo valore può variare tra i diversi componenti edilizi che compongono il modello virtuale.

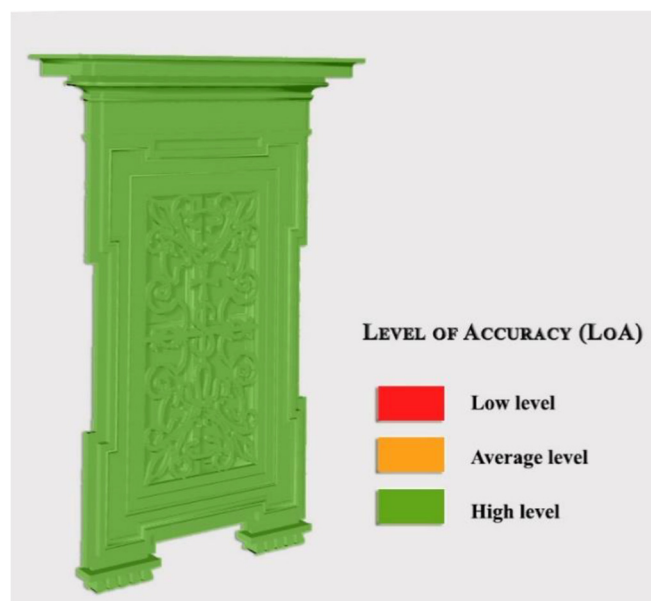


Figura 62 - Livello di accuratezza (LoA)

Fonte: P. Maiezza (2019) As-Built Reliability In Architectural Hbim Modeling.

5.2.2.2. Fase 2

In genere vengono impiegati metodi di rilievo ad elevata definizione TLS o fotogrammetria digitale, da cui tramite elaborazione dei dati viene prodotta la nuvola di punti che rappresenta la base su cui creare un modello H-BIM.

5.2.2.3. Fase 3

Dall'elaborazione della nuvola di punti, inseguito, si passa alla digitalizzazione As-Built.

Questa è la fase più complessa e laboriosa nella quale si creano i componenti architettonici dell'edificio. Il processo non richiede solo un ricalco della realtà ma un'analisi e sintesi degli aspetti costruttivi, oltre a quelle geometrici e materici.

Ogni elemento è intelligente e contiene nelle proprietà le informazioni storiche, materiche e costruttive. Dal modello parametrico ottenuto, si estraggono piante, prospetti, sezioni, assonometrie, dettagli, abachi e render fotorealistici.

5.2.2.4. Fase 4

In questa fase il modello tridimensionale viene arricchito di tutte le informazioni raccolte nella prima fase di indagine storica, inserendo dati sulle geometrie, sui materiali e i loro stato di degrado, gli eventuali interventi di restauro precedentemente effettuati identificando le fasi storiche dell'edificio al fine di costruire un archivio digitale del bene storico.

Il campanile: modellazione digitale

6.1.Importazione della nuvola di punti

Una volta ottenute le nuvole di punti (esterna e interna) come output da Agisoft Photoscan in formato *.las è stato necessario effettuare ulteriori passaggi per l'importazione all'interno di Revit.

Per prima cosa le nuvole sono state importate all'interno del Software Recap Pro al fine di creare un'unica nuvola di punti in formato *.rcp compatibile con il software Revit.

Una volta inserita la nuvola all'interno di Revit si è presentato un primo problema dovuto al fatto che il software non riusciva a gestire le coordinate globali.

È stato quindi necessario importare nuovamente all'interno di Recap Pro la nuvola e definire un nuovo sistema di coordinate locali. Dopo aver creato il nuovo progetto è stato impostato il sistema di riferimento globale UTM 32N e sono state forzate manualmente le coordinate di origine con lo strumento "update origin".

Il campanile: modellazione digitale - Importazione della nuvola di punti

Una volta salvato il progetto, la nuvola con le coordinate ridotte è stata importata come collegamento esterno in Revit scegliendo come posizionamento “a coordinate condivise”.

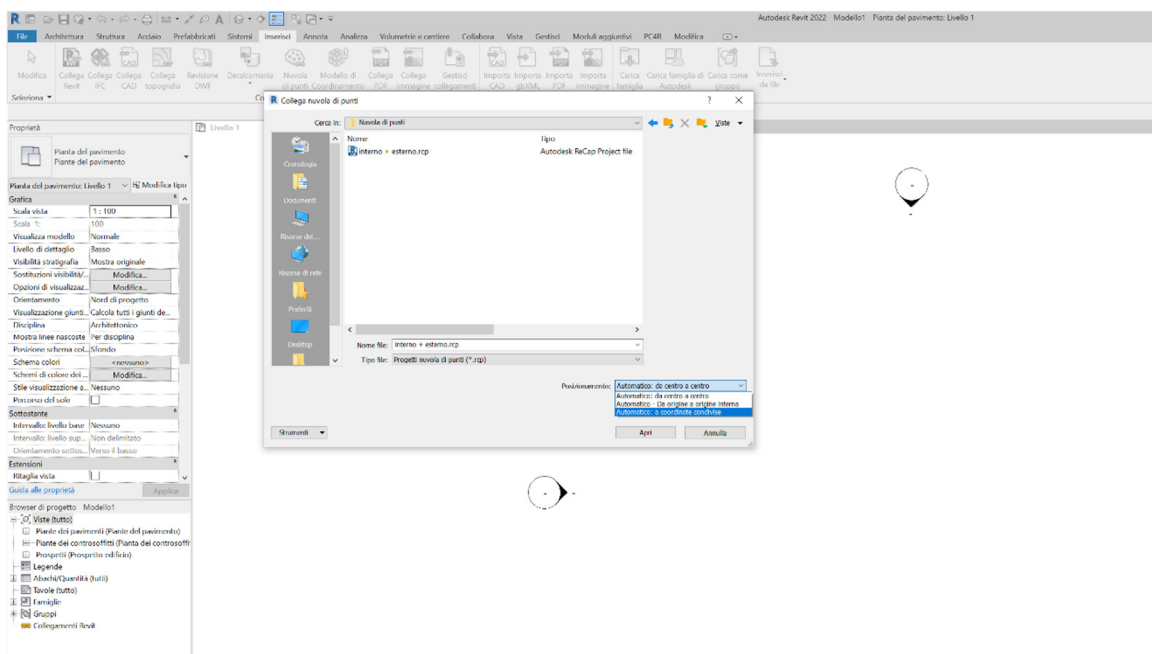


Figura 65 - Inserimento della nuvola di punti a coordinate condivise



Figura 64 - Nuvola di punti esterna

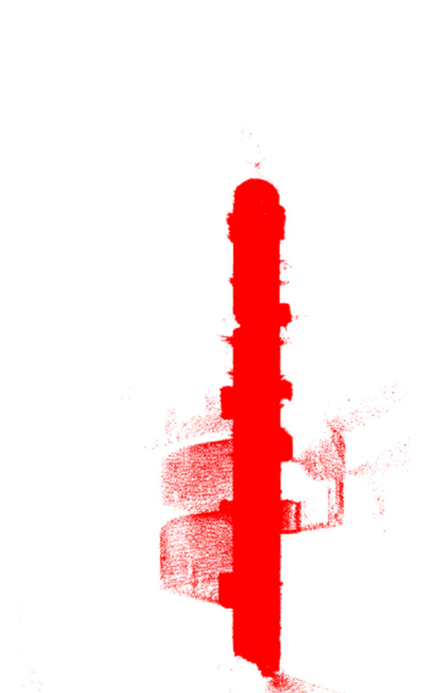


Figura 64 - Nuvola di punti interna

6.2.Creazione delle masse locali

Per la costruzione del modello tridimensionale si è scelto di lavorare suddividendo il campanile in otto volumi principali.

Una volta generati i volumi principali, sono stati realizzati in un secondo momento tutti gli elementi di dettaglio e decoro.

La costruzione è avvenuta quasi totalmente lavorando sulla nuvola dei punti, ad eccezione del piano terra su cui è stato necessario lavorare contemporaneamente con un dwg esistente, poiché in assenza di un numero sufficiente di punti per la definizione dei muri perimetrali adiacenti al complesso parrocchiale.

Per prima cosa posizionandosi in vista di prospetto, sono stati creati dei livelli tracciando dalla nuvola dei punti delle linee di sezione in corrispondenza dei piani principali. Ogni livello tracciato genera una vista in pianta su cui è possibile lavorare.

Successivamente sono stati definiti in modo più specifico per ogni volume tutti quei piani utili per una restituzione più accurata (140 circa).

Per la conformazione del campanile che generalmente dal basso verso l'alto rastrema e in alcuni punti a causa del degrado varia in sezione, non è stato possibile tracciare con il sistema tradizionale i muri ma è stato necessario creare prima delle masse locali che successivamente sono state trasformate in muri. Lavorare con le masse concettuali ha permesso di arrivare ad un risultato il più aderente alla realtà.

Per i primi due volumi sono stati rilevati più piani di riferimento, ovvero la nuvola è stata sezionata in più piani differenti in quota in corrispondenza dei punti dove vi era evidente un cambiamento di andamento irregolare del muro.

Per ogni piano è stato tracciato in pianta il contorno del muro, associando le linee al singolo piano e definendole come *linee di riferimento*. Successivamente i piani

Il campanile: modellazione digitale - Creazione delle masse locali

creati sono stati selezionati e uniti con il comando *Crea forma solido* creando il volume totale.

Questo processo è stato lungo e laborioso e, per arrivare ad un risultato soddisfacente sono state effettuate numerosi tentativi. Si è arrivati alla conclusione che Revit gestisce correttamente la costruzione di un solido interposto tra i piani, quando il numero di punti di ciascun piano è il medesimo.

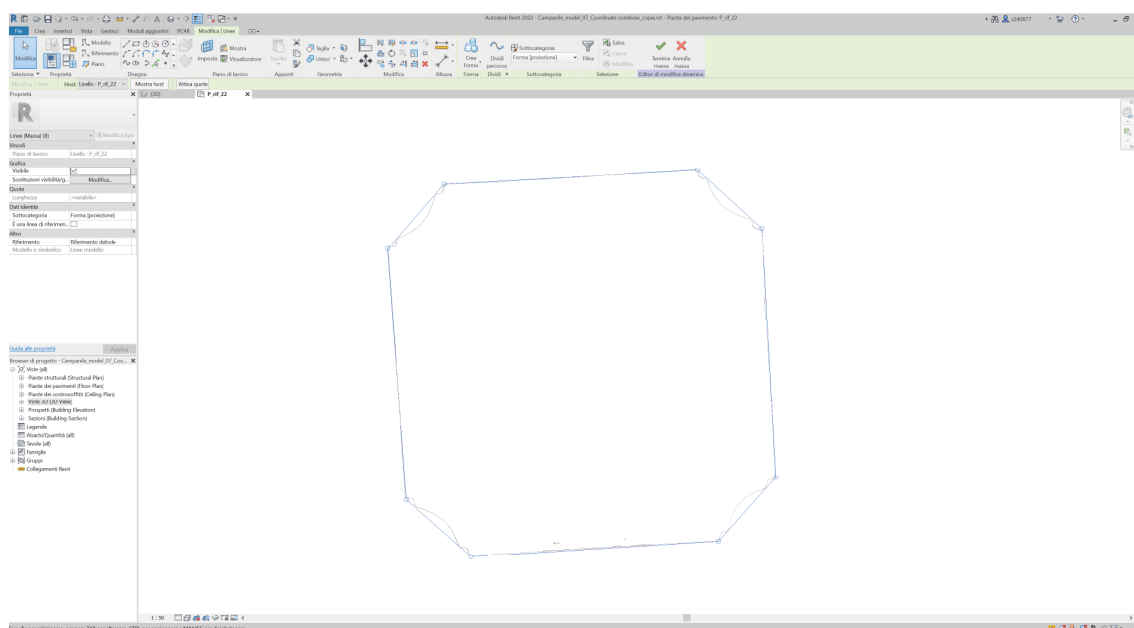


Figura 66 - Creazione della massa: ricalco in pianta della nuvola di punti Autodesk Revit 2022

Una volta creata la massa, con il comando *muro da superficie* sono state selezionate le singole facce della massa e trasformate in muri, rendendo il volume parametrico.

La muratura è stata creata duplicando una famiglia di sistema e assegnandogli il nuovo nome *muro campanile*. In questo modo è stato possibile lavorare con dei muri specifici e associare le informazioni di spessore e stratigrafia reali. Tutti gli elementi appartenenti alla categoria muro sono stati successivamente associati alla famiglia creata.

Il campanile: modellazione digitale - Creazione delle masse locali

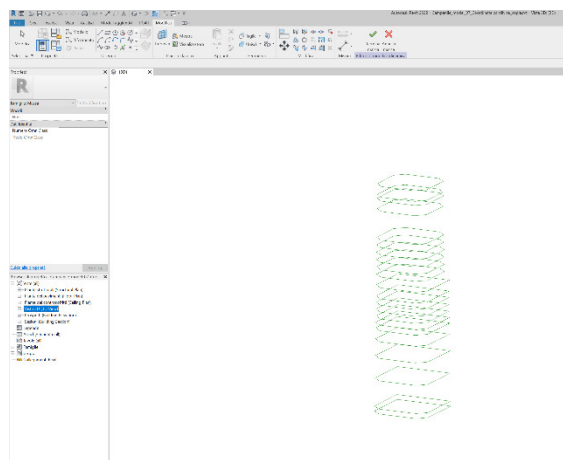


Figura 68 - Visualizzazione dei piani costruiti

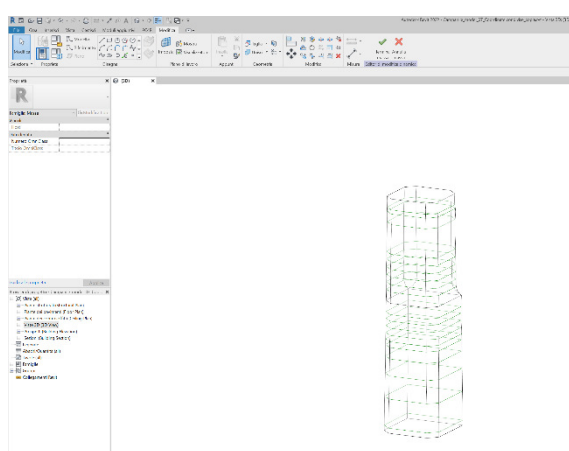


Figura 67 - Unione dei piani e creazione della massa solida

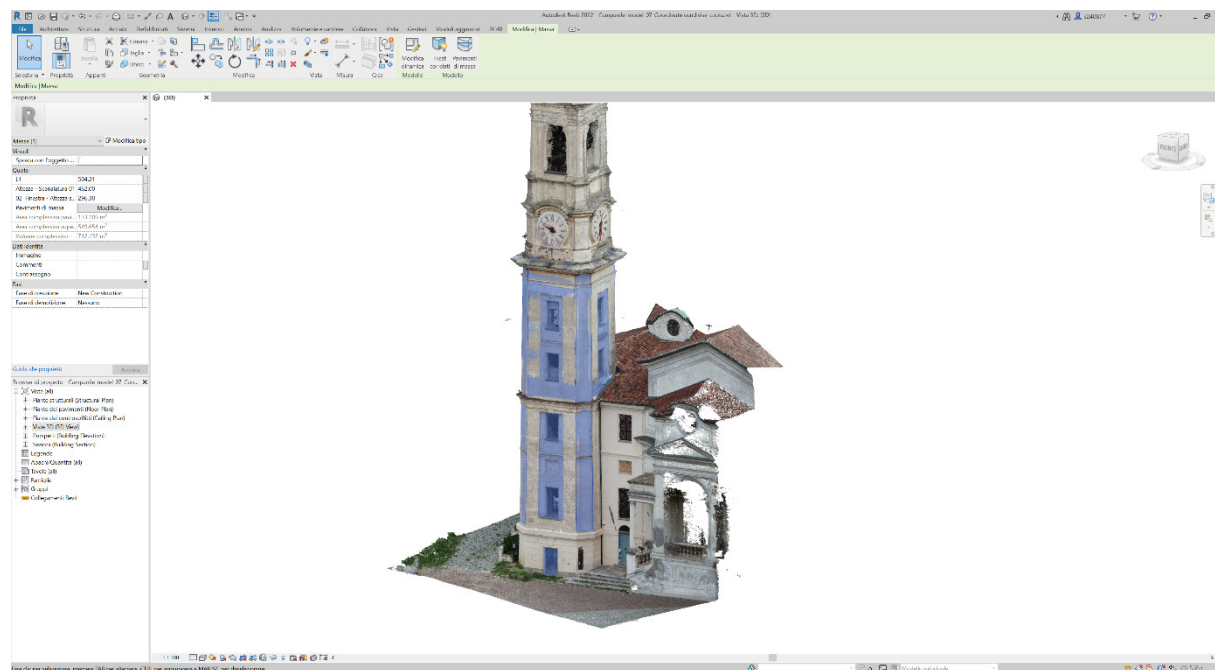


Figura 69 - Visualizzazione della massa in sovrapposizione alla nuvola di punti Autodesk Revit 2022

6.3. Murature irregolari

Per i volumi successivi le geometrie si sono rilevate più complesse, in questo caso Revit non è riuscito a gestire le facce e trasformarle in muri poiché queste seguendo un andamento curvilineo e irregolare si intersecavano a vicenda.

È stato quindi studiato un ulteriore metodo per la modellazione di queste parti creando delle masse più semplici e regolari il cui perimetro avrebbe compreso l'area del campanile.

Una volta creata la massa concettuale è stata trasformata in muro da superficie risultando quindi un semplice volume in muratura rettangolare. Su questo è stato possibile poi tramite la creazione di un componente *modello locale*, categorizzato come famiglia di sistema *muri*, realizzare un solido di sottrazione con il comando *vuoti e unione*.

Questo comando permette di creare un solido generato dall'unione di due piani: il piano di base e il piano superiore.

Sono stati scelti quindi due piani tipo per ogni volume in prospetto e tracciati i perimetri dalla nuvola di punti per ogni piano nella vista pianta, dopo aver definito le forme sono stati uniti realizzando un solido denominato *vuoto*.

Una volta creato, il solido deve essere sottratto al muro tramite il comando *taglia* selezionando il muro e poi il vuoto di sottrazione ottenendo un volume con le geometrie desiderate.

Questo metodo è risultato efficiente poiché il muro preso in considerazione non mostrava un andamento irregolare in sezione e quindi due sezioni sono risultate sufficienti per restituire la realtà.

Il procedimento è stato il medesimo per gli altri volumi restanti tranne per quelli il cui andamento era rettilineo per cui al posto di scegliere il metodo di vuoto da

Il campanile: modellazione digitale - Murature irregolari

unione è stato scelto un *vuoto da estrusione* definendo un piano di riferimento, il tracciato dalla nuvola e l'altezza di estrusione.

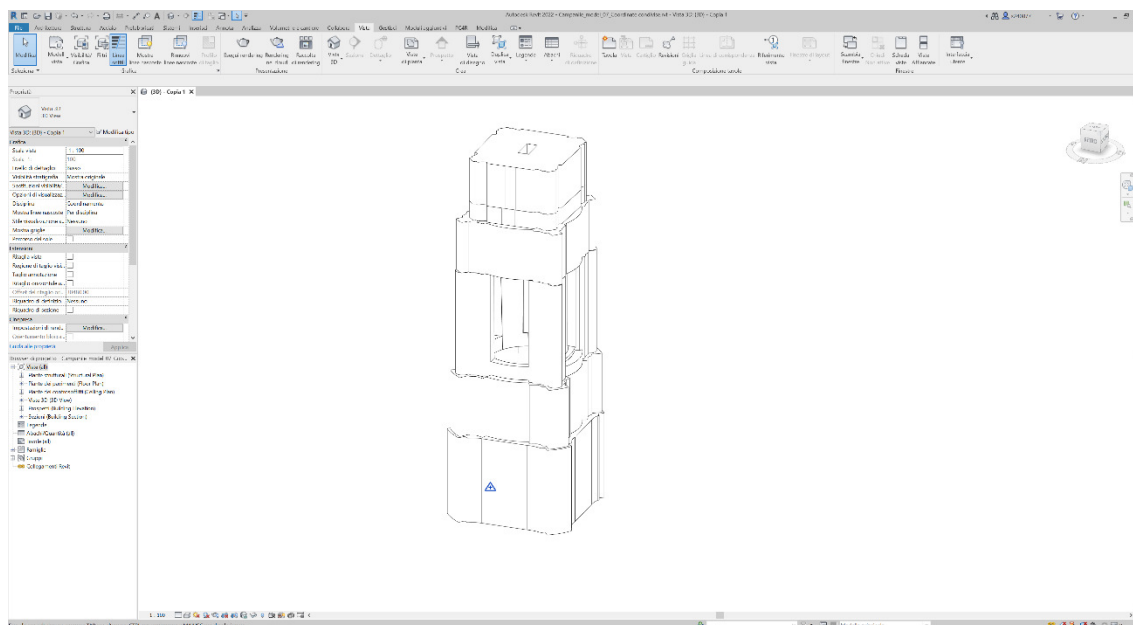


Figura 70 - Creazione dei volumi superiori con modello locale Autodesk Revit 2022

Una volta individuati i principali volumi, sono state realizzate le nicchie, le aperture e i muri angolari per ogni prospetto (Nord- Sud – Ovest -Est) dei tre volumi fino ad arrivare all'altezza dell'orologio.

Per ogni vista sono stati individuati i piani di riferimento in corrispondenza dell'intradosso ed estradosso di ogni elemento.

Dopo aver creato i piani è stato possibile visualizzare in pianta la profondità e determinare il tracciato dalla nuvola di punti.

Ogni elemento è stato modellato singolarmente poiché le forme di ogni elemento si differenziavano uno dall'altro. Anche in questo caso si è scelto di utilizzare la modellazione locale di componenti creando dei vuoti da unione sottraendoli al muro principale. Questa scelta è dovuta al fatto che il disegno di ogni nicchia era curvilineo e non regolare e in questo modo è stato possibile unire le diverse geometrie. Per i primi tre volumi sono stati individuati ventisette solidi di sottrazione di cui ventuno tra nicchie e aperture e sei angolari.

Per il profilo curvilineo del muro angolare si sono dovute fare delle approssimazioni rispetto al muro reale poiché con il comando vuoto da unione si sono potuti scegliere solo due piani, non sufficienti per seguire correttamente l'andamento del muro.

In questo caso si evidenzia che il software Revit avendo a disposizione pochi comandi non è sempre in grado di restituire geometrie complesse come quelle che si possono trovare in edifici storici ma è necessario a volte semplificare tenendo conto di possibili errori di approssimazione.

Attualmente, in ambito HBIM, la mancanza di funzionalità per la riproduzione del reale stato di conservazione e degrado di un elemento rappresenta una delle maggiori limitazioni. Il motivo principale di queste lacune è dovuto al fatto che il BIM è stato concepito come metodo di lavoro per il settore delle nuove costruzioni, nella realizzazione di elementi standard e parametrici non soggetti a nessun fenomeno di degrado. La sua applicazione è stata poi estesa negli ultimi anni al settore del patrimonio esistente e oggi per la restituzione della nuvola di punti in modello tridimensionale vengono adattati i comandi esistenti non pensati per una restituzione AS-Built, impiegando per lo più elementi di massa e componenti di modello generici non appartenenti a librerie esistenti ma realizzate nel progetto stesso.

6.4.Modellazione di cornici e decori

Per la creazione delle cornici e modanature sono stati utilizzati tre metodi in base alla complessità di ognuna.

Le cornici del basamento sono state create lavorando all'interno del modello con i componenti locali tramite *un'estrusione su percorso*.

Una volta impostati i piani di riferimento sulla vista di prospetto, il comando chiede di indicare in pianta il percorso su cui eseguire l'estrusione, sono quindi state selezionate le linee perimetrali del muro create precedentemente e poi dalla vista sezione è stato ricalcato il profilo direttamente dalla nuvola ed estruso.

Anche in questo caso, rispetto al modello reale, si sono dovute effettuare delle semplificazioni scegliendo un unico profilo come riferimento.

Il software è stato in grado di gestire tutti i profili su percorsi regolari, cosa che invece non è avvenuta per i muri irregolari con andamento sia rettilineo che curvilineo.

Si è ricorso quindi all'utilizzo del software Rhinoceros e di Autocad per le creazioni di NURBS più complesse.

In questo caso si è proceduto sezionando in vista di prospetto il muro precedentemente creato in Revit in corrispondenza delle cornici e modanature, esportando in pianta la vista in formato *.dwg in modo tale che le linee fossero modificabili e caricabili all'interno di Rhinoceros e AutoCAD.

Il profilo delle cornici è stato tracciato, all'interno di AutoCAD, importando la nuvola di punti e sezionandola in modo tale da avere un profilo in formato *.dwg caricabile all'interno del software Rhino.

La creazione delle NURBS è stata realizzata tramite lo strumento *sweep rail 1* nella barra degli strumenti *surface*.

Il campanile: modellazione digitale - Modellazione di cornici e decori

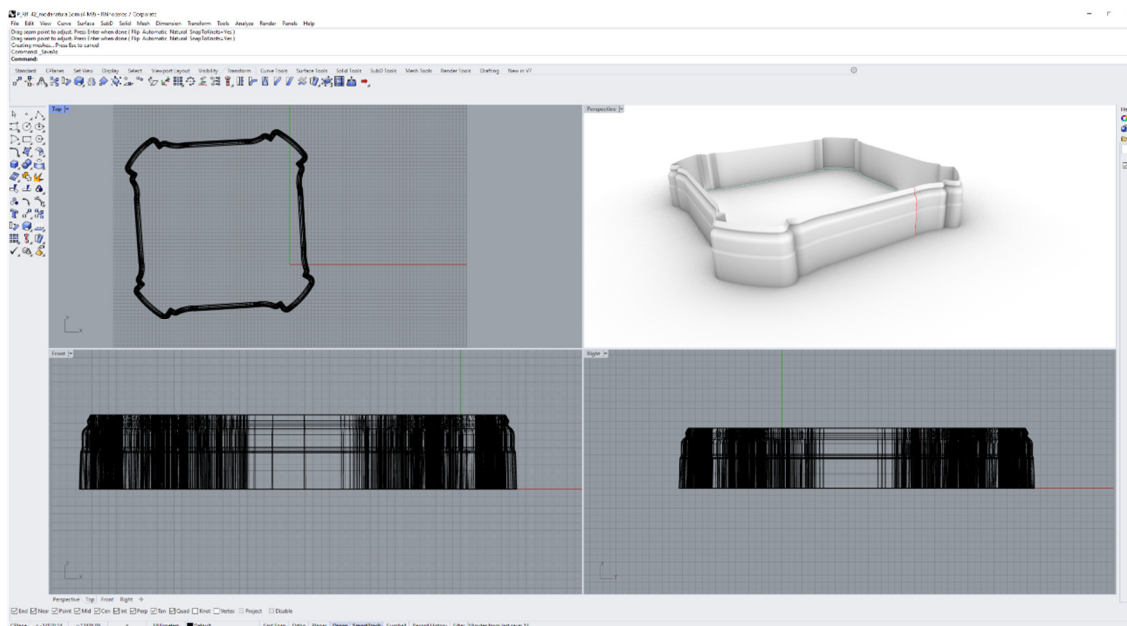


Figura 71 - Esempio di creazione di Nurbs in Rhino

Il risultato si è rivelato fedele alla realtà e successivamente il modello è stato esportato in formato *.sat e importato all'interno dell'ambiente Revit.

In seguito all'importazione e al posizionamento corretto delle cornici e modanature create, è stato possibile assegnare all'oggetto importato il materiale degli altri elementi già realizzati in Revit. Questo procedimento è stato ripetuto per tutti quelle cornici e modanature complesse che si appoggiavano su muri irregolari.

All'interno di Revit purtroppo le Nurbs vengono visualizzate con tutte le linee di costruzione della geometria e questo problema avviene in tutte le modalità di visualizzazione (linee nascoste, realistico, ombreggiato) tranne che nella vista di rendering.

Il campanile: modellazione digitale - Modellazione di cornici e decori

Un ulteriore metodo di modellazione è stato sperimentato per la realizzazione delle cornici più complesse all'interno del software Revit.

Per la realizzazione della cornice sono stati creati più componenti da modello locale, suddividendo il profilo in più elementi quante le modanature esistenti.

Ogni elemento è stato creato tramite il comando *unione*, andando a ricalcare in pianta dalla nuvola di punti l'intero perimetro e rifacendolo sia per il piano base che il piano superiore. Una volta creato l'elemento inferiore si è proceduto a quello successivo avendo come riferimento le linee appena create e così via fino alla conclusione della cornice.

Con questo metodo non ci sono stati problemi di visualizzazione, ma le forme ottenute sono approssimative rispetto alla realtà.

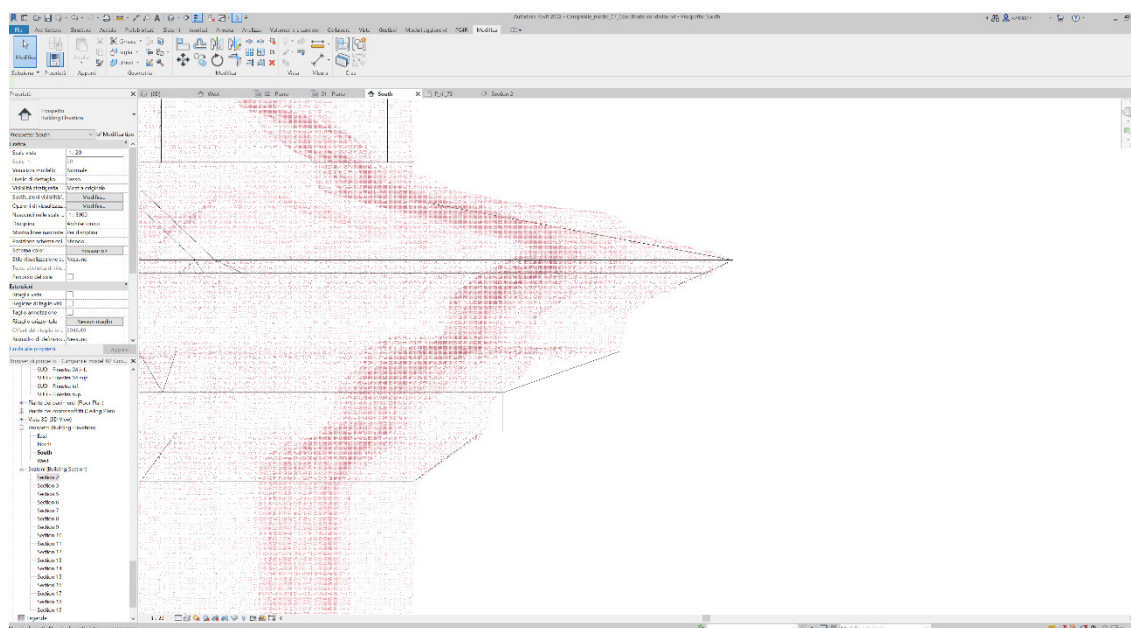


Figura 72 - Realizzazione di una cornice con comando "unione" Autodesk Revit 2022

6.5. Modellazione della guglia

La base della guglia è stata suddivisa in due elementi ognuno dei quali modellati tramite componenti da modello locale con il comando estrusione su percorso.

In questo caso è importante andare con ordine nella modellazione in modo tale che una volta terminato il primo elemento lo si possa utilizzare come base per il secondo.

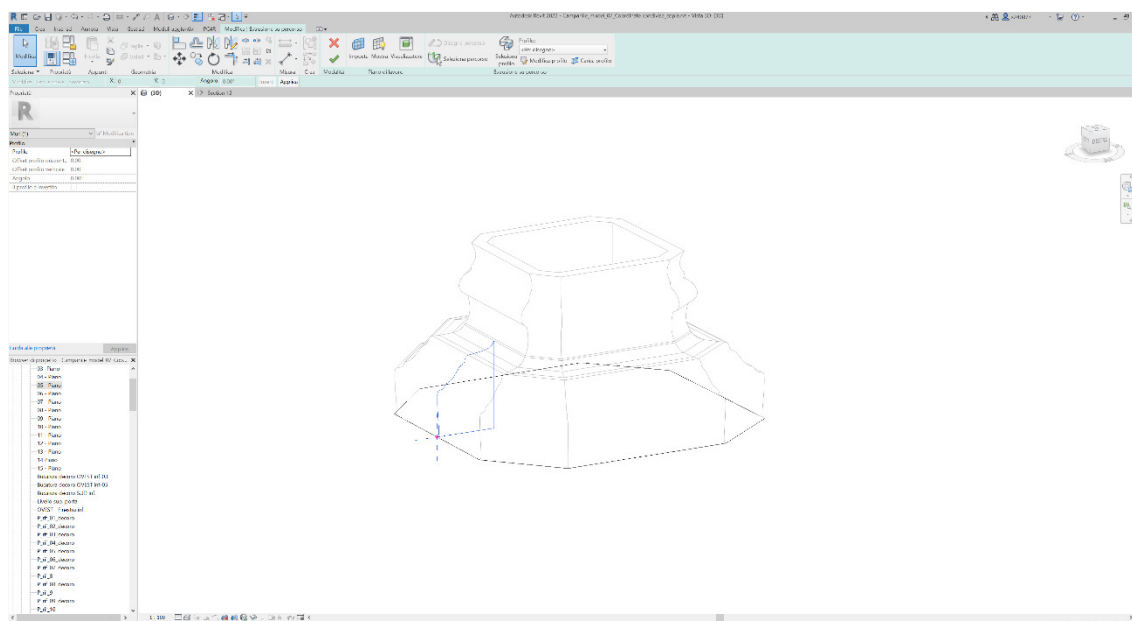


Figura 73 - Vista 3D Estrusione su percorso Base guglia Autodesk Revit 2022

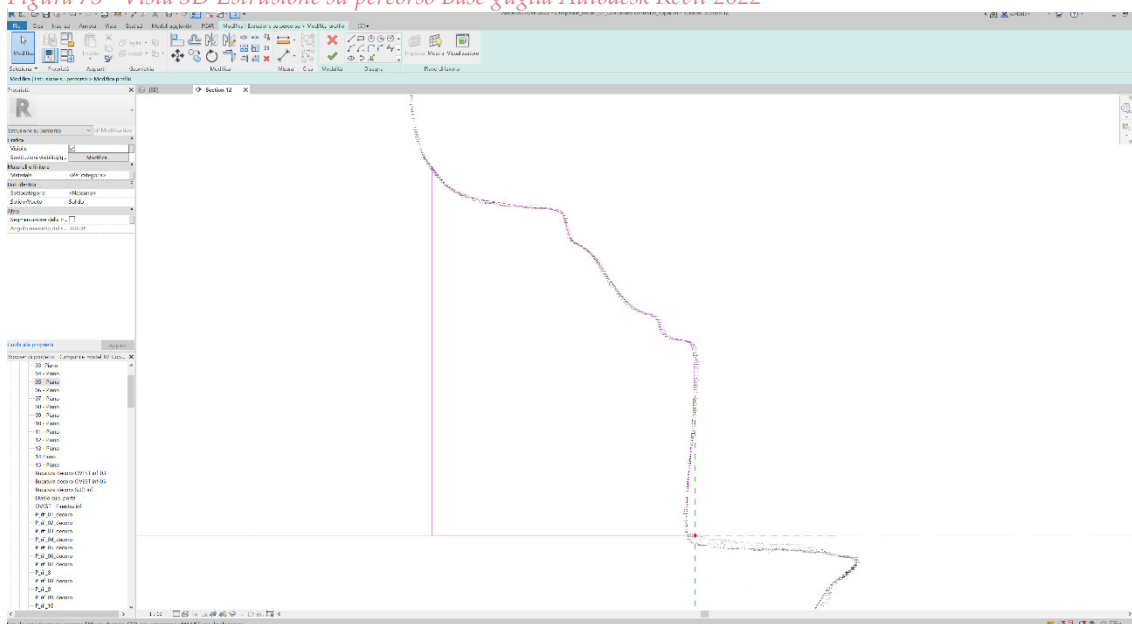


Figura 74 - Profilo in sezione - Ricalco da nuvola di punti Base guglia Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Modellazione della guglia

Per la costruzione della guglia, anche in questo caso, a causa della complessità delle geometrie, si è optato per l'utilizzo di una massa concettuale riuscendo ad ottenere un risultato realistico.

Una volta definiti i piani di riferimento necessari, in pianta sono stati ricalcati i tracciati dalla nuvola di punti e uniti creando la massa locale a cui è stato successivamente assegnato il materiale.

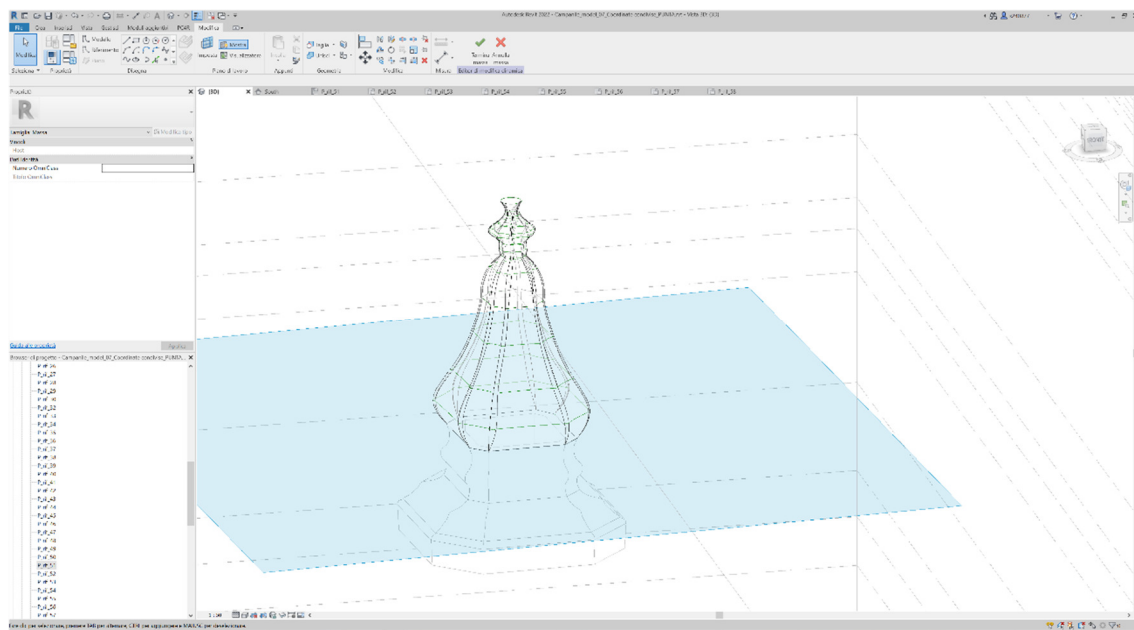


Figura 76 - Creazione della guglia: vista 3D piani di riferimento Autodesk Revit 2022

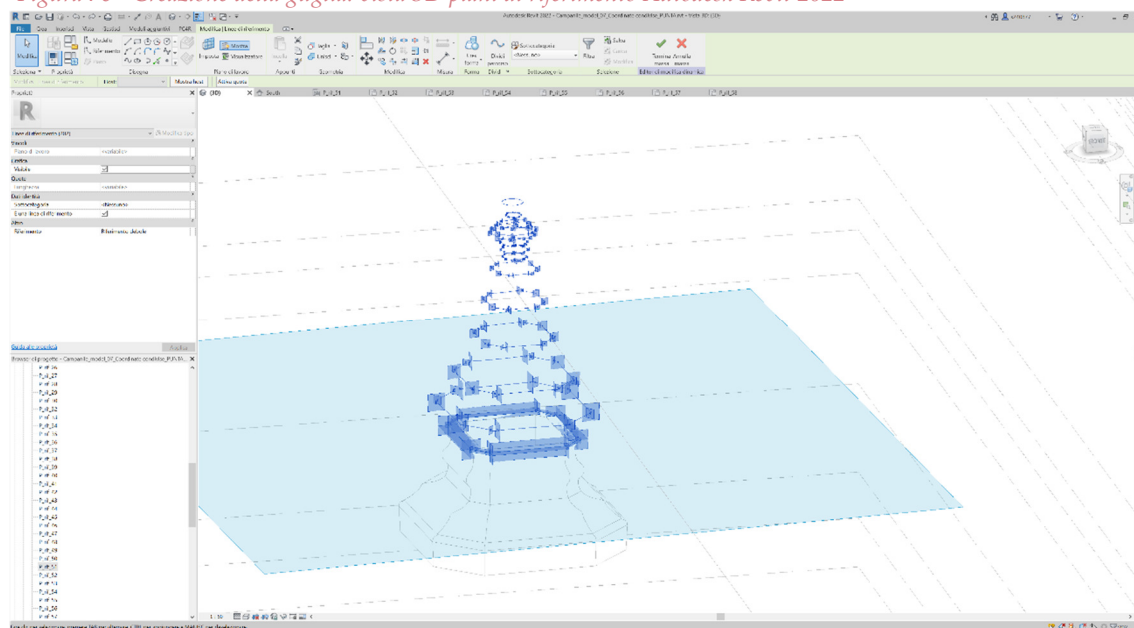


Figura 75 - Creazione della guglia: vista 3D unione dei piani e realizzazione della massa concettuale Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Modellazione della guglia

Per la realizzazione dell'ellissoide è stato impiegato un componente da modello locale, in questo caso dalla vista in sezione è stato possibile ridisegnare il profilo dalla nuvola e con il comando *rivoluzione* una volta definito l'asse, creare il solido.

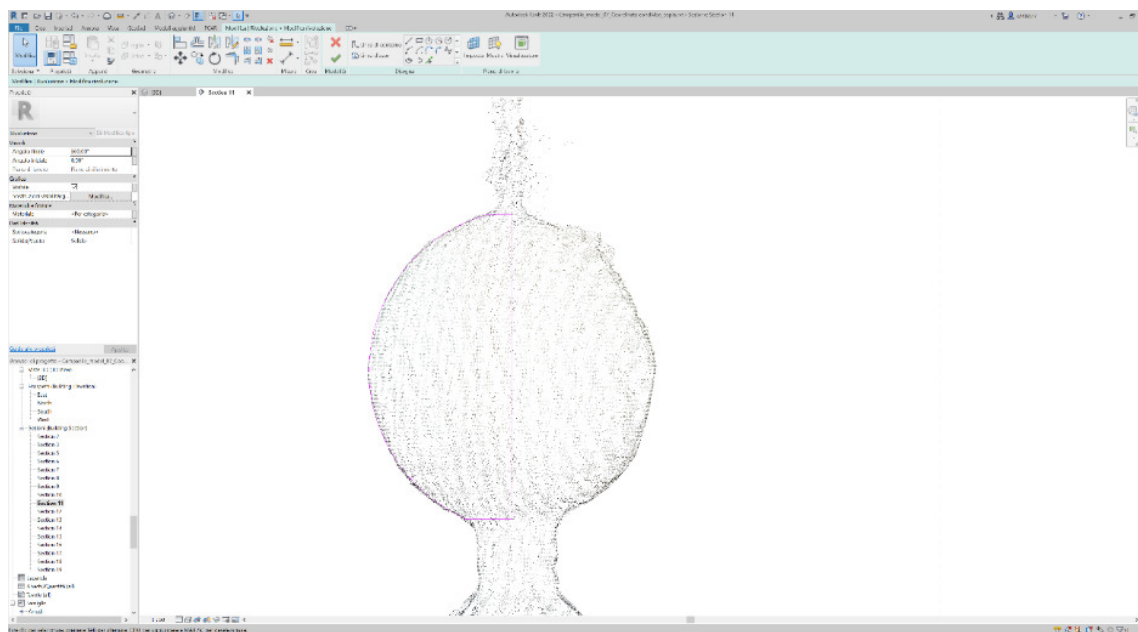


Figura 78 - Profilo di rivoluzione in vista sezione Autodesk Revit 2022

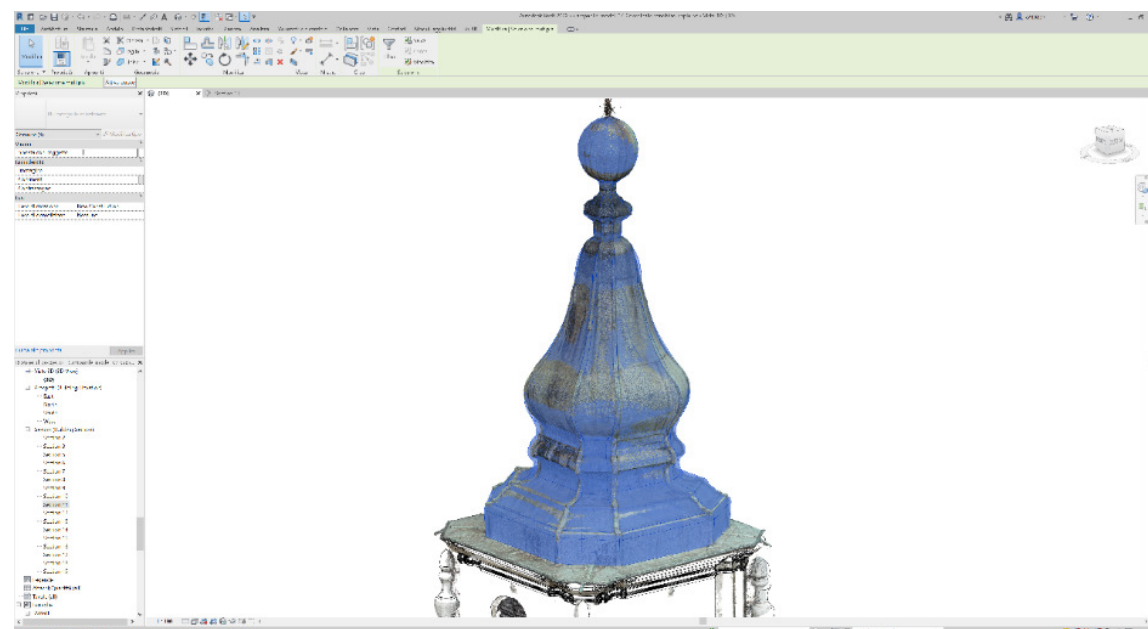


Figura 77 - Vista 3D sovrapposizione del modello sulla nuvola di punti Autodesk Revit 2022

6.6. Creazione di famiglie di elementi decorativi

Alcuni degli elementi che costituiscono l'apparato decorativo del campanile sono ripetuti lungo le quattro facce. Questo particolare genere di elementi è stato creato come *famiglie caricabili*.

La famiglia permette di creare degli elementi personalizzati, definire dei parametri, come informazioni metriche o materiche e importarli all'interno del file di progetto come elementi esterni.

Inoltre, è possibile creare un catalogo di elementi decorativi classici in modo tale da portarli avere a disposizione per eventuali progetti simili futuri.

Di seguito si riportano alcune delle famiglie realizzate, in particolare quelle dei pinnacoli al livello attico e dei modiglioni a livello della cella campanaria.

Dal menu principale di Revit è stata creata una nuova famiglia selezionando come editor di famiglia un *modello generico metrico*. Il profilo del pinnacolo è stato realizzato ricalcando la nuvola dei punti in vista di sezione all'interno del software AutoCAD e successivamente importato all'interno della famiglia, in ambiente Revit, in formato dwg.

Il campanile: modellazione digitale - Creazione di famiglie di elementi decorativi

Il profilo è stato, tramite la definizione di alcuni piani di lavoro, quotato associando ad ogni distanza tra i piani un'informazione metrica dell'oggetto, come l'altezza e il raggio di rivoluzione della base.

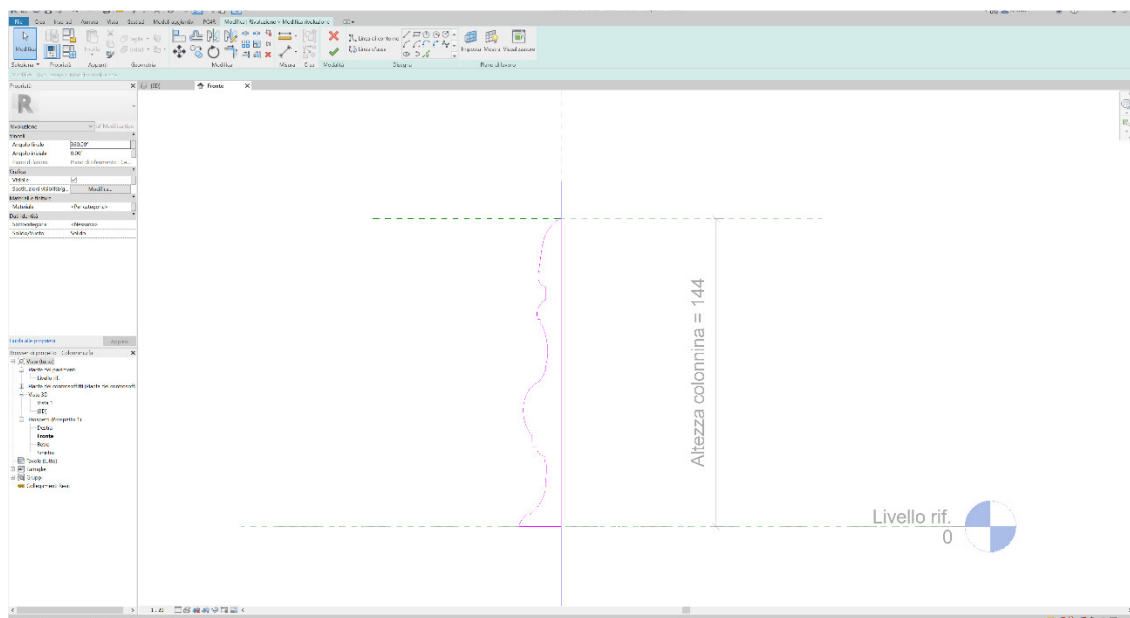


Figura 79 - Creazione della famiglia Pinnacolo Autodesk Revit 2022

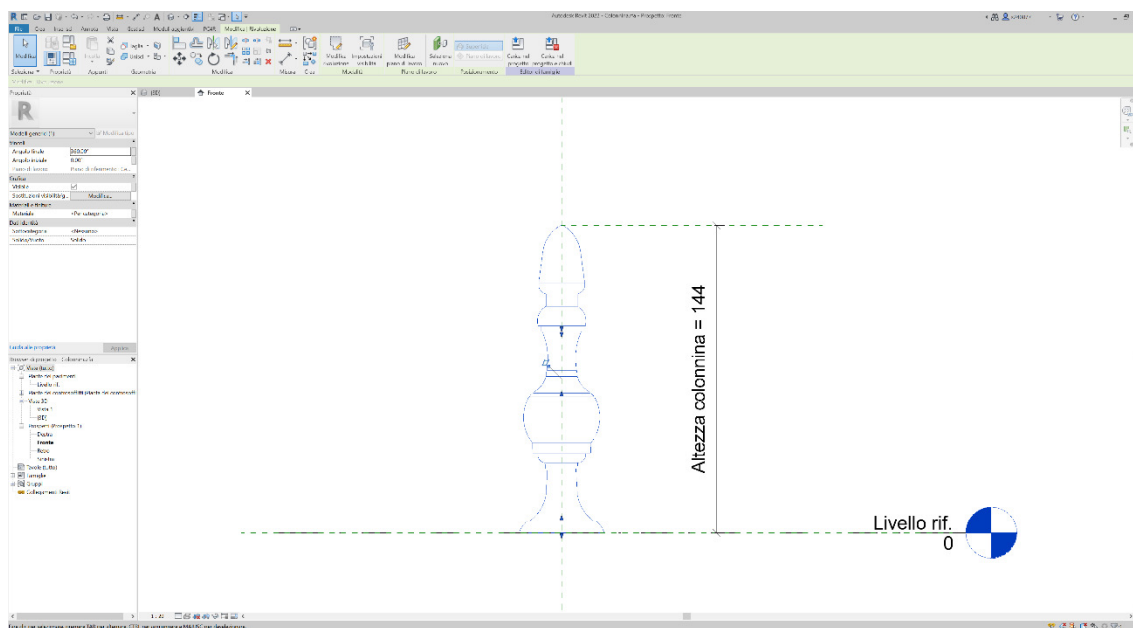


Figura 80 - Visualizzazione della famiglia pinnacolo realizzata Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Creazione di famiglie di elementi decorativi

Allo stesso modo per la creazione della famiglia del modiglione si è scelto un *modello profilo metrico*, importando il profilo ridisegnato in sezione da AutoCAD ed estraendolo con il comando *estrusione* all'interno dell'editor famiglia.

Anche in questo caso è stato possibile inserire alcuni parametri di altezza dei singoli elementi. Dopo averli caricati all'interno del progetto, l'oggetto si potrà interrogare selezionandolo e i parametri inseriti saranno visibili nelle proprietà di tipo.

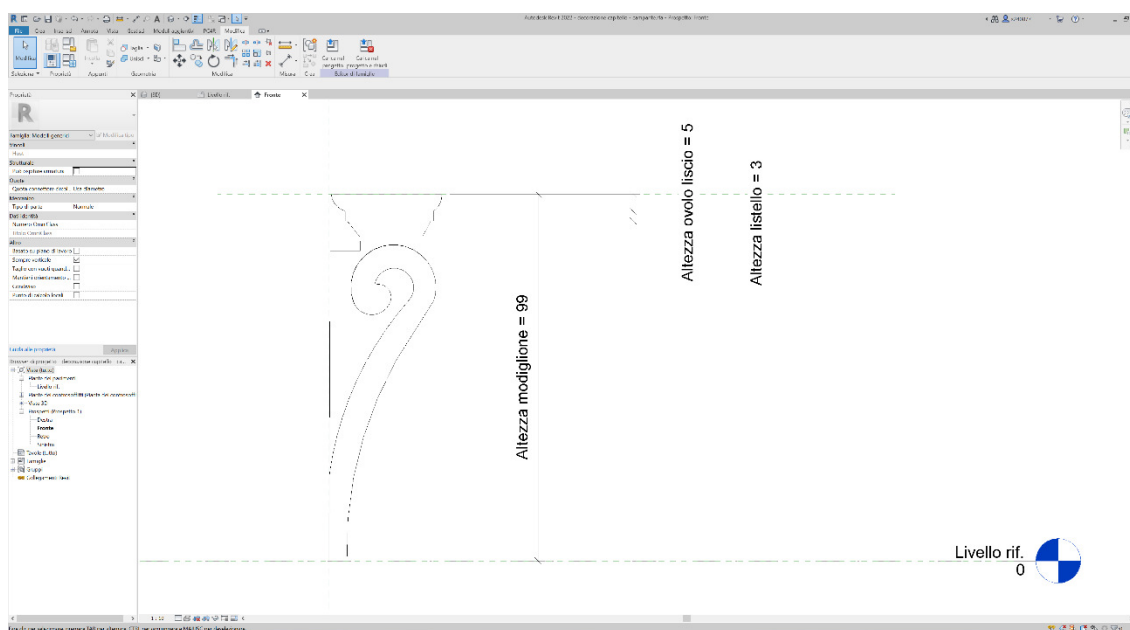


Figura 81 - Creazione della famiglia modiglione e inserimento dei parametri di spessore Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Creazione di famiglie di elementi decorativi

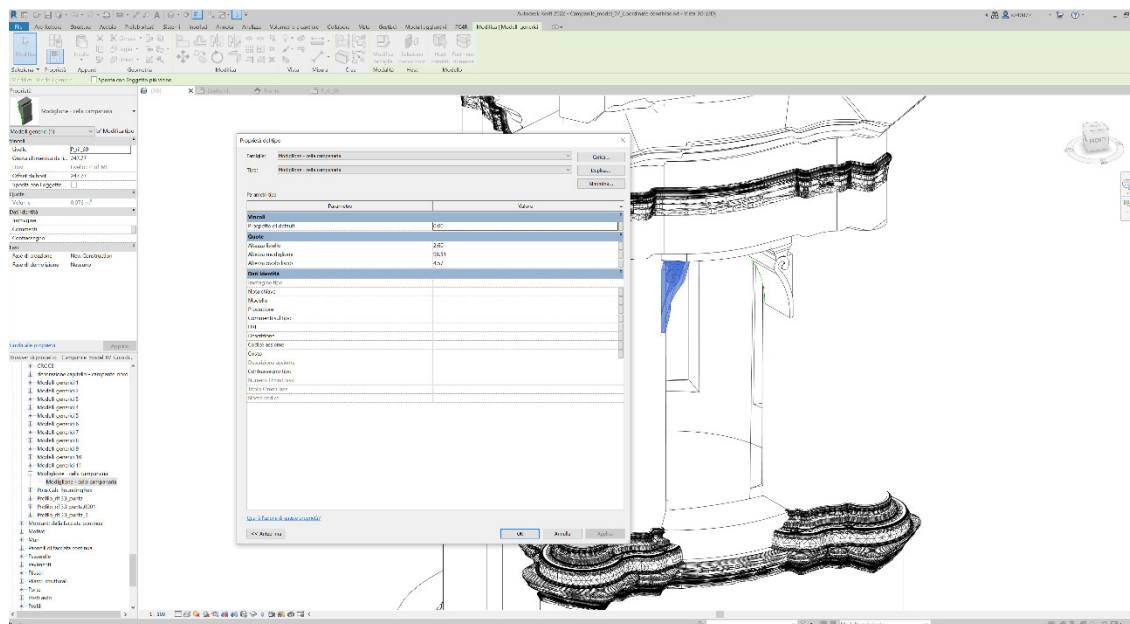


Figura 82 - Interrogazione del modiglione e visualizzazione delle proprietà Autodesk Revit 2022

6.7. Modellazione della scala interna

Per la modellazione della scala elicoidale è stata utilizzata la nuvola di punti interna acquisita con il sistema di mobile mapping SLAM Zeb Revo RT.

La nuvola di punti interna non dispone rispetto a quella esterna, di informazioni radiometriche. È stato quindi più complesso individuare precisamente le linee di contorno in modo corretto.

In generale è stato possibile tracciare le pedate di ogni gradino ma le informazioni in sezione non sono bastate per definire in modo realistico l'alzata e il suo degrado ben visibile nelle foto.

All'interno della piattaforma Revit è possibile creare una scala personalizzata indicando il contorno e l'alzata e il percorso di scala. Inoltre, è necessario indicare nel pannello delle proprietà l'inizio delle scale ovvero il *livello di base* e il livello di fine, il *livello superiore*.

In modo automatico il software individuerà l'alzata in base al numero di gradini inseriti. Purtroppo, Revit non dispone ancora di comandi che possano restituire "*as built*", poiché non vi sono modi effettuare modifiche delle pedate e una volta creata non è possibile sottrarre solidi e quindi creare le fessure e il degrado per una restituzione attuale del campanile.

Il campanile: modellazione digitale - Modellazione della scala interna



Figura 83 - Scala campanile, documentazione del degrado



Figura 84 - Scala campanile, documentazione del degrado

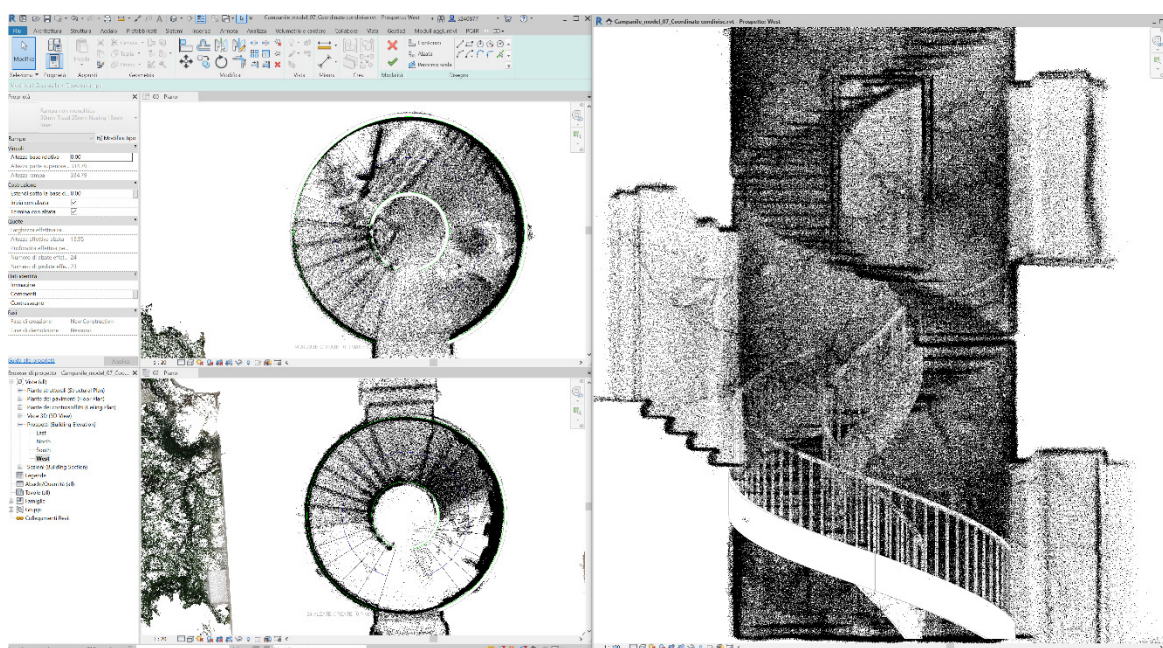


Figura 85 - Creazione della scala personalizzata, vista in pianta e sezione Autodesk Revit 2022

6.8. Arricchimento del modello

Oltre ai parametri di dimensioni e spessore e stratigrafia è possibile assegnare tipologie ulteriori parametri e documentare il modello.

Ad esempio, quando si assegna un materiale è possibile inserire delle informazioni specifiche all'interno del Browser dei materiali nella sezione identità.

Nel caso del campanile di Vittone sono stati inserite informazioni riguardo la dimensione dei mattoni, la composizione delle murature e degli intonaci.

Famiglia: Muro di base
Tipo: Muratura_campanile
Spessore totale: 190.00 (Default)
Resistenza (R): 3.4815 (m²·K)/W
Massa termica: 2447.76 kJ/(m²·K)

Altezza esempio: 600.00

Strati

	Funzione	Materiale	Spessore	Ripiegature	Materiale strutturale	Variabile
1	Finitura 1 [4]	Intonaco	2.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Contorno del nucleo	Strati sopra ripiegatura	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Struttura [1]	Muratura in mattoni	188.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Contorno del nucleo	Strati sotto ripiegatura	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Identità Grafica Aspetto +

Nome: Intonaco

Informazioni descrittive

Descrizione: Realizzato in tre strati: il primo interno detto rinzaffo composto da calcina forte e sabbia grossa, il secondo, rizzatura composto da calcina forte e sabbia più fine e il terzo esterno, imbiancamento composto da impasto ancora più fine

Classe: Muratura

Commenti:

Parole chiave:

Informazioni sul prodotto

Produttore:

Modello:

Costo:

URL:

Informazioni sull'annotazione di Revit

Nota chiave:

Contrassegno:

Figura 86 - Inserimento di informazioni sul materiale nel Browser dei materiali Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Arricchimento del modello

The image shows the Revit Properties palette for a brick wall element. The 'Identità' tab is active, showing the name 'Muratura in mattoni'. The 'Informazioni descrittive' section contains fields for 'Descrizione' (Mattoni Piemontese Sei once di lunghezza = 25.68 cm Tre once di larghezza = 12.84 cm Una oncia di altezza = 6.42 cm), 'Classe' (Muratura), 'Commenti' (Numero totale di mattoni impiegati: 206600), and 'Parole chiave'. The 'Informazioni sul prodotto' section includes fields for 'Produttore', 'Modello', 'Costo', and 'URL'. The 'Informazioni sull'annotazione di Revit' section includes fields for 'Nota chiave' and 'Contrassegno'.

Figura 87 - Inserimento di informazioni sulla tipologia di mattone utilizzato nella costruzione del campanile Autodesk Revit 2022

Ulteriori parametri sono stati creati come parametri globali e parametri di progetto.

Per prima cosa sono stati creati i parametri di progetto applicandoli alla categoria “Muri”.

The image shows the 'Proprietà parametro' dialog box in Revit. The 'Tipo di parametro' section has 'Parametro di progetto' selected. The 'Dati parametro' section shows 'Nome' as 'Descrizione', 'Disciplina' as 'Comune', 'Tipo di parametro' as 'Testo', and 'Raggruppa parametro in' as 'Materiali e finiture'. The 'Descrizione comandi' section is empty. The 'Categorie' section shows a list of categories with 'Muri' selected. The 'Elenco dei filtri' is set to '<multipli>'. The 'Aggiungi a tutti gli elementi nelle categorie selezionate' checkbox is checked. The 'OK' button is highlighted.

Figura 88 - Creazione di parametri di progetto Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Arricchimento del modello

Dopo aver creato il parametro di progetto è possibile associare un parametro globale, nel caso particolare del campanile sono stati creati alcuni parametri di testo per inserire all'interno delle proprietà degli elementi alcune informazioni tratte dalle Istruzioni elementari (1760) di Vittone sulle tipologie costruttive.

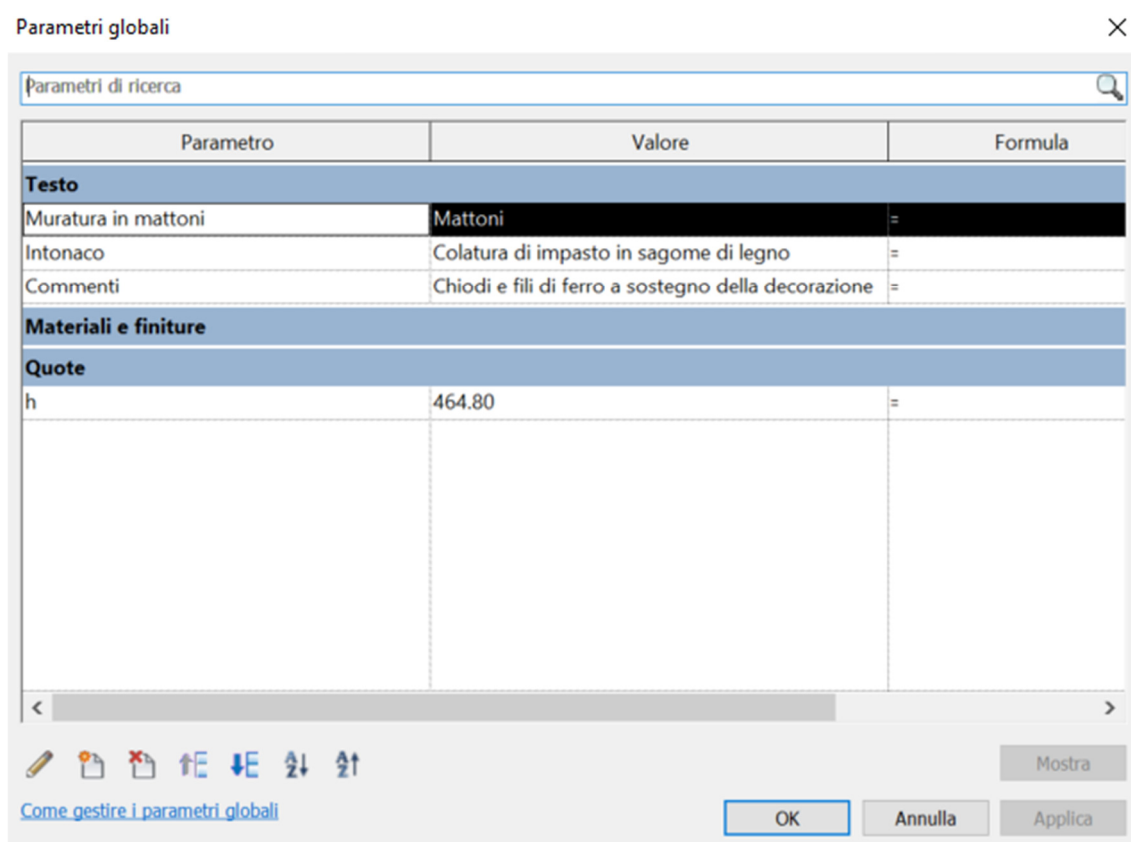


Figura 89 - Creazione di parametri globali Autodesk Revit 2022

Il campanile: modellazione digitale - Arricchimento del modello

Inoltre, sono stati creati parametri di immagine per poter associare ad ogni elemento un database di immagini derivate dalle ortofoto di output del rilievo 3D.

Di seguito si mostra come esempio la fascia marcapiano superiore del basamento, all'interno delle proprietà sono stati inseriti il parametro di "materiali e finiture", il parametro di "immagine" che documenta lo stato di fatto, il parametro di "commento" riguardante la sua costruzione e assegnata la fase di "esistente".

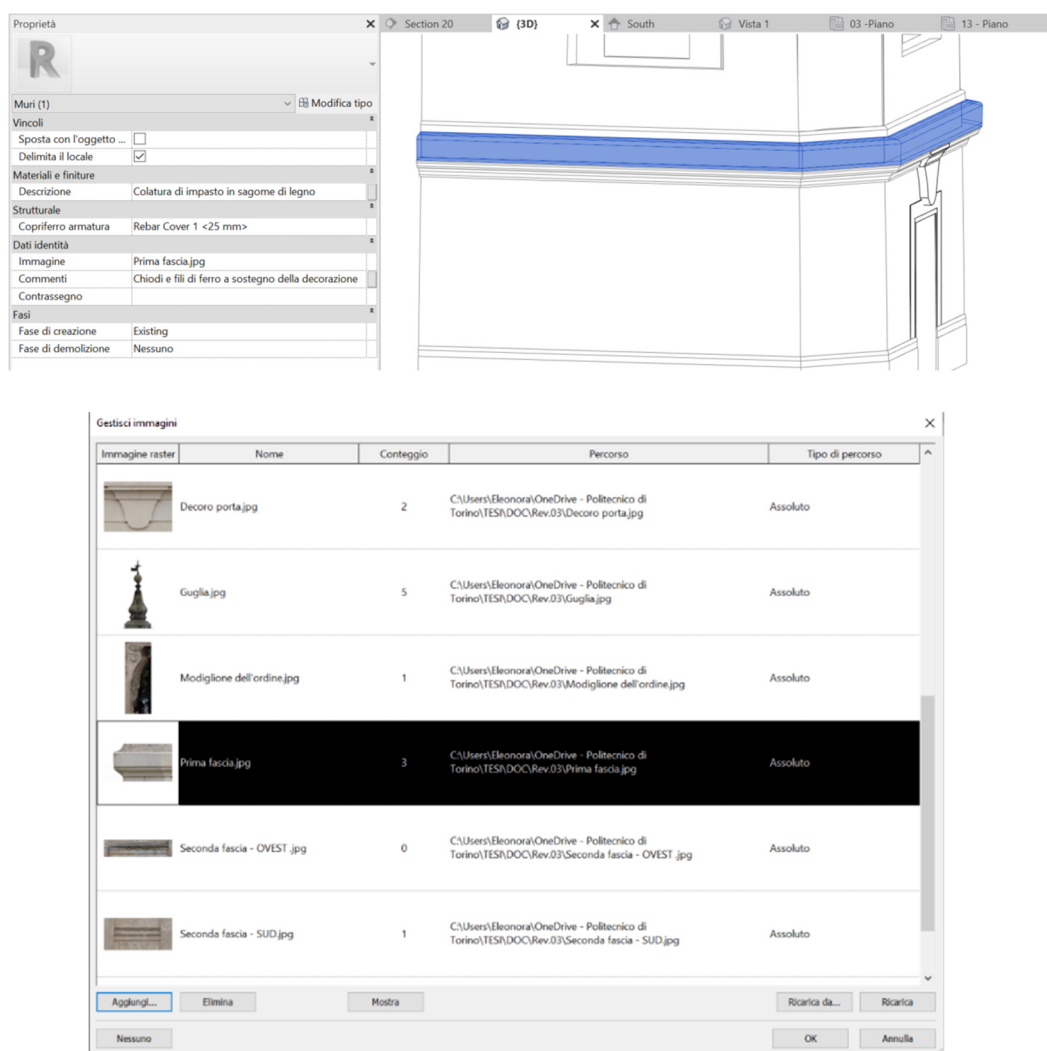


Figura 90 - Inserimento di parametri "immagine" Autodesk Revit 2022

6.9.Plugin analizzati

Per la restituzione digitale del campanile è stato sperimentato il plugin Pointcab for Revit e il plugin AS-Built for revit della FARO.

6.9.1. PointCab

È stata installata la versione di prova della durata di 25 ore dal sito ufficiale di Pointcab.

Pointcab offre molteplici tool per facilitare al modellatore alcuni procedimenti in modo semiautomatico.

L'interesse verso questo plugin si è rivolta per la sua capacità di estrarre dalla nuvola di punti ortofoto dalla quale automaticamente traccia i contorni trasformandoli in linee vettoriali.

Nel lavoro specifico di questa tesi la parte più lunga e laboriosa è stata infatti il tracciamento della nuvola per più piani di sezione per la creazione di un solido che seguisse correttamente l'andamento del muro.

Pointcab offre un approccio di lavoro simultaneo, aprendo un doppio software, Pointcab e il modello di Revit contemporaneamente.

Nella barra degli strumenti una volta installato il plugin comparirà la possibilità di trasferire tutte le operazioni eseguite all'interno di Pointcab direttamente nel modello di progetto Revit in maniera simultanea.

Una volta installato Pointcab e creato un nuovo progetto verrà richiesto l'inserimento delle scansioni della nuvola di punti. Dalla nuvola di punti, il software crea delle viste di prospetto e pianta di default da cui è possibile estrarre delle sezioni.

Il campanile: modellazione digitale - Plugin analizzati

Dalla barra degli strumenti si sceglie il comando layout section e si creano i piani di sezione desiderati.

Nell'editor lavori si potranno modificare alcuni parametri e poi dare il comando *elabora tutti i lavori* selezionando le viste di piante create.

La nuova vista elaborata dal software è un'ortofoto, successivamente con il comando *Vettorizzatore* è stata selezionata l'area di interesse. Nell'editor di lavoro è possibile variare la soglia di selezione e successivamente con il comando trova linee verranno create le linee vettoriali.

Purtroppo, nonostante siano state fatte più prove con soglie differenti il software non è riuscito a rilevare correttamente le linee curve ma solamente quelle rette.

Non è stato quindi possibile utilizzare il plugin per facilitare il lavoro manuale ma è stato utile al fine di sperimentare le possibilità che il software dispone.

Il software offre tanti altri tool di modellazione, nel caso particolare del campanile le forme erano particolarmente irregolari, curvilinee e rettilinee e per questo motivo non è stato possibile utilizzare metodi semiautomatici.

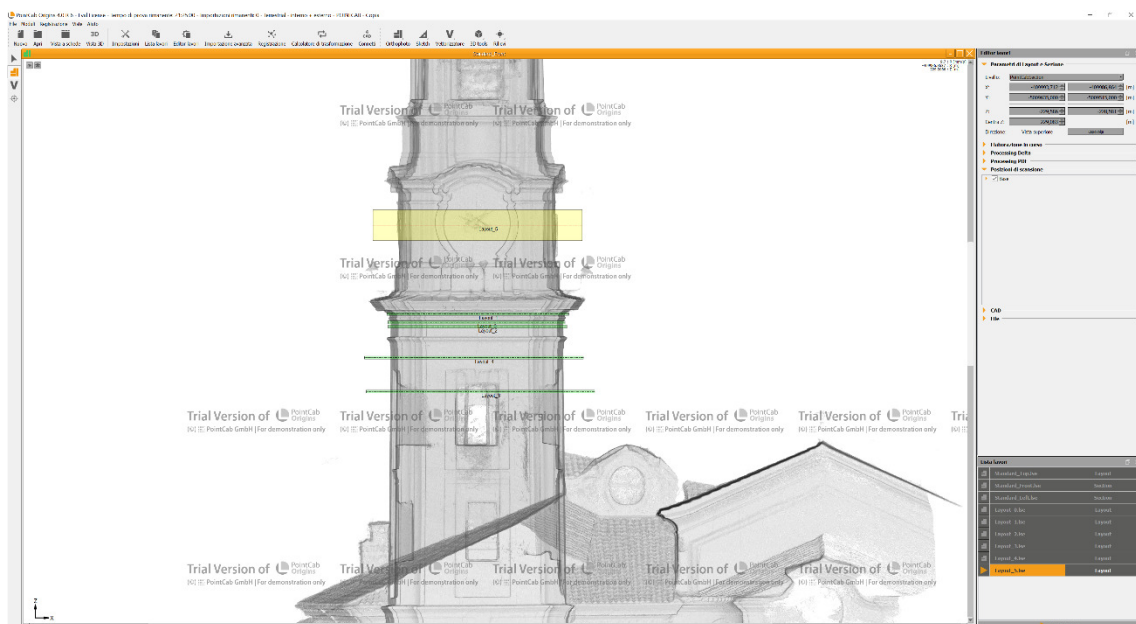


Figura 91 - Creazione della vista con "Layout e sezione" PointCab

Il campanile: modellazione digitale - Plugin analizzati

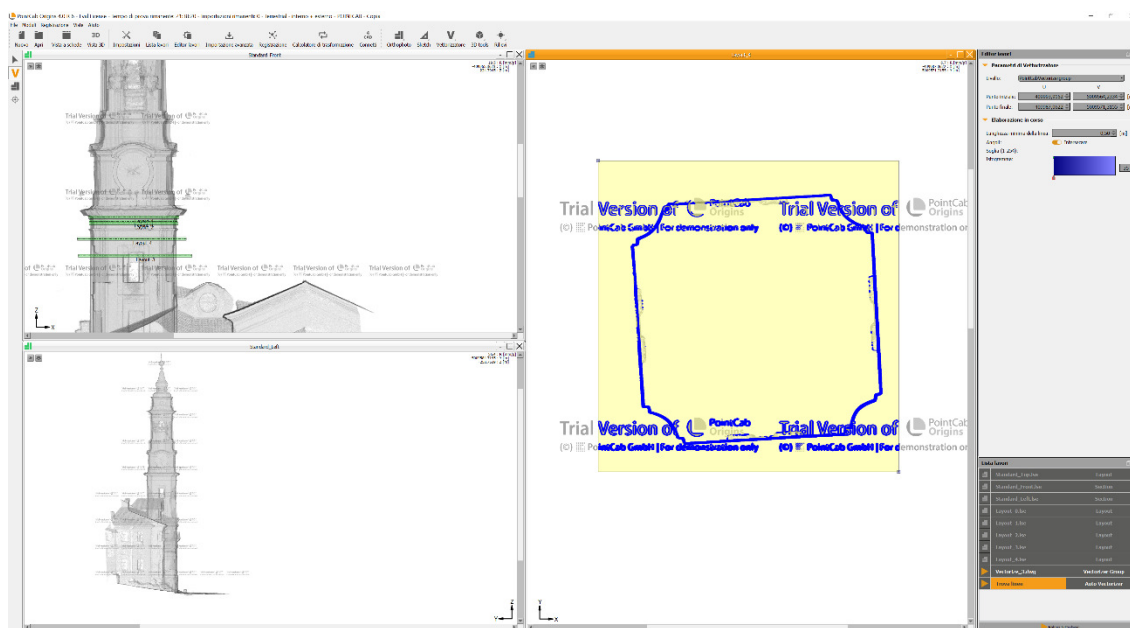


Figura 93 - Impostazione della soglia di selezione con "Vettorizzatore" PointCab

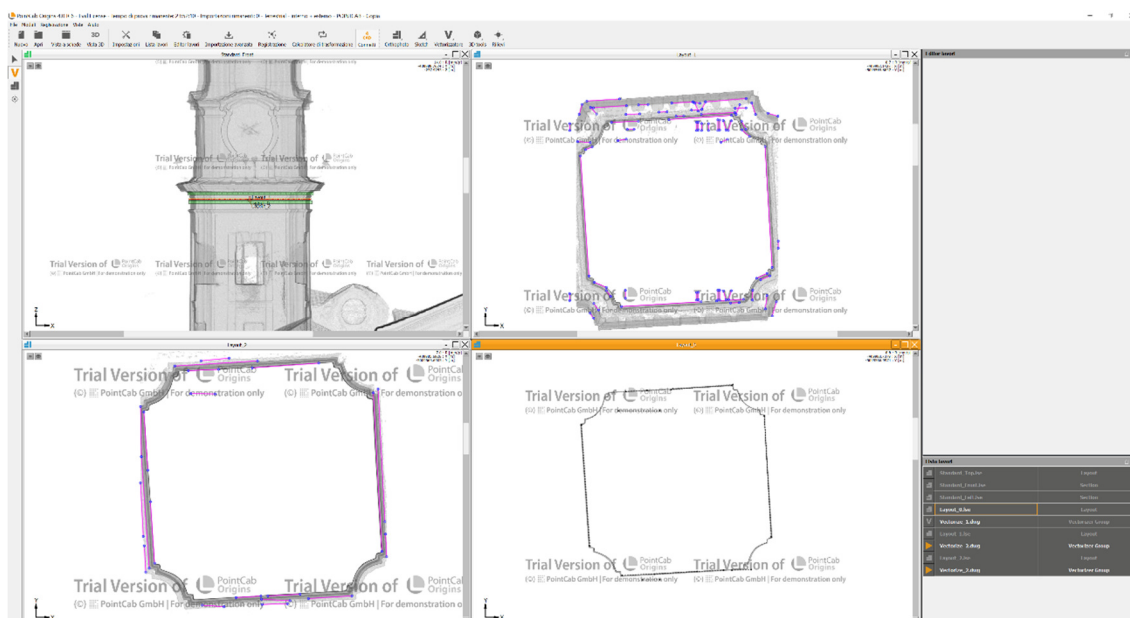


Figura 92 - Vettorizzazione con "Trova Linee" PointCab

6.9.2. AS-BUILT for Revit – FARO

Dopo aver completato il modello è stata valutata l'accuratezza calcolando la deviazione dei punti del modello creato con quelli della nuvola di punti.

Per questa specifica funzione di analisi è stato utilizzato il plugin AS – Built for Revit della FARO.

È possibile richiedere la versione di prova di durata di 30 giorni dal sito ufficiale della FARO e, una volta installato apparirà nella barra degli strumenti dell'interfaccia di Revit una sezione di strumenti del Plugin AS-Built.

Dalla vista 3D, nella sezione *AS – Built analisi*, attraverso il comando *Calculate*, sono state selezionate le facce dell'edificio.

In seguito, il plugin richiede l'inserimento di alcuni parametri: la dimensione della griglia di punti da rilevare e la massima distanza dalla superficie.

In questo caso l'elaborazione dei dati richiede una grande potenza di calcolo è stata quindi scelta una griglia di 10 cm diminuendo i punti della nuvola da rilevare. Per il parametro della distanza è stato scelto un range massimo di 10 cm.

Poiché il campanile possiede un numero elevato di facce, il plugin non è riuscito a gestire l'analisi. Si presume che la *versione demo* sia limitata in quanto non è stato possibile svolgere l'analisi per tutte le facce contemporaneamente ma sono effettuate più analisi differenti ed esportati i singoli dati facendone poi una media.

Per le modanature realizzate con Rhinoceros 7 il plugin non ha rilevato le superfici e quindi non ha calcolato la deviazione dei punti.

Una volta ottenuti i risultati è possibile esportarli in un file .txt e poi rielaborarlo in un foglio Excel per verificare la deviazione media totale.

Il campanile: modellazione digitale - Plugin analizzati

Come si può notare il risultato per la maggior parte dei punti rientra nel range verde. In generale si nota nella parte inferiore si è ottenuto un buon risultato con una deviazione media di circa 1 cm. Nella parte superiore la deviazione è di dimensione maggiore ma comunque contenuti nel valore medio di 2 cm.

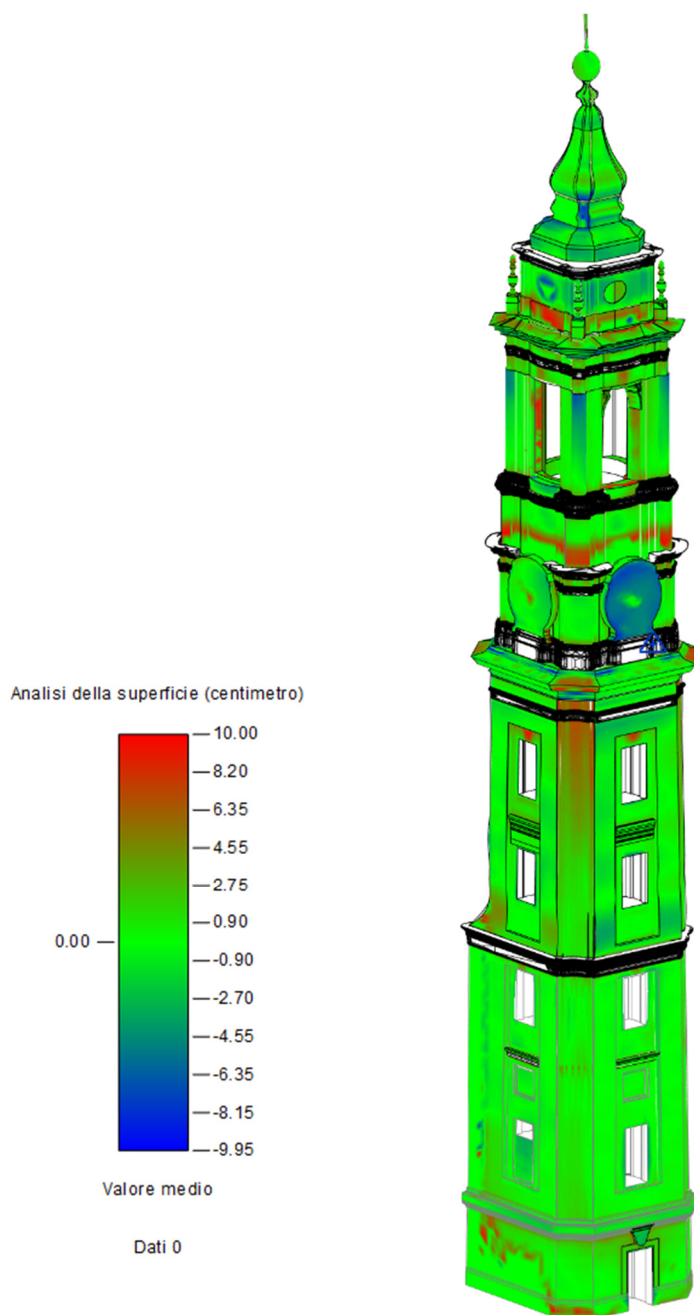


Figura 94 - Analisi della superficie

Il campanile: modellazione digitale - Plugin analizzati

Si evidenzia inoltre che alcuni errori rilevati dal plugin evidenziati in rosso o blu, (come ad esempio nella parte che sormonta l'orologio) sono elementi non realizzati nel modello di Revit e quindi valutati come errore.

Conclusioni

La ricerca della tesi ha esplorato le potenzialità delle tecniche range-based e image-based impiegate per il rilievo tridimensionale di un complesso patrimonio storico come quello del Campanile della chiesa di Santa Marta di Vittone.

Dal rilievo tridimensionale è stata ottenuta una nuvola di punti ad elevata accuratezza contenente informazioni geometriche e radiometriche che hanno facilitato la comprensione dell'edificio per la modellazione parametrica AS-built.

Il caso studio dimostra la possibilità di sviluppare modelli tridimensionali ad elevata precisione di una certa complessità a partire da nuvole di punti e di poter associare non solo informazioni geometriche ma anche storiche e materiche costruendo un database dello stato di fatto dell'edificio.

Dal lavoro svolto è stata presentata una metodologia per la costruzione di un modello 3D intelligente per architetture complesse. Il modello ottenuto potrà eventualmente essere utilizzato in futuro per una mappatura dei degradi, analisi strutturali, gestione dei materiali necessari per un restauro e il monitoraggio per il tutto il ciclo di vita dell'edificio.

Nel lavoro di tesi si mettono in luce anche le criticità dei software parametrici ancora limitati a pochi comandi per la modellazione di elementi irregolari e non standardizzati. Oggi, i software parametrici non dispongono di funzionalità apposite per la restituzione di edifici storici rendendo la modellazione lunga, complessa e qualche volta non aderente alla realtà. Per i motivi elencati non è stato possibile restituire interamente l'edificio con un solo programma parametrico ma è stato necessario integrare la modellazione utilizzare software di modellazione geometrica.

I Plugin tutt'ora in commercio offrono la possibilità di riconoscere oggetti esistenti in modo semiautomatico ma non di particolare complessità. Si spera che la ricerca

Conclusioni

sviluppi un sistema di algoritmi più efficiente per l'ottenimento di forme complesse e realistiche in modo del tutto automatico.

L'HBIM è ancora poco conosciuto e utilizzato a livello globale. In un futuro prossimo, il suo utilizzo, associato alle nuove tecniche di rilievo tridimensionale apporterebbe vantaggi per la documentazione digitale e la conservazione dei beni di valore storico sempre più richiesta dal settore dei Beni culturali.

L'Italia, in particolare modo rappresenta un punto di riferimento culturale e artistico a livello internazionale ed è inevitabile che molto presto, alla luce di quanto annuncia il Decreto Ministeriale 1° dicembre 2017 (che prevede una progressiva introduzione dei metodi HBIM come ambiente di gestione e modellazione digitale standard), andrà incontro all'innovazione e ai nuovi processi BIM per la digitalizzazione e restauro del patrimonio esistente.

L'utilizzo di questa metodologia costringe ad un nuovo approccio lavorativo e ad un cambiamento della mentalità nella gestione dei dati e nella progettazione. Data la complessità dello strumento attualmente le figure professionali che lo impiegano sono relativamente poche.

Probabilmente, i professionisti del settore edilizio non sono ancora pronti ad un cambiamento così radicale.

Bibliografia

STORIA

Casalis, G., (1851). Dizionario geografico storico-statistico-commerciale degli Stati di S. M. il Re di Sardegna. Torino, G. Maspero e G. Marzorati, pp.198-215.

Dondana, A., (1884). Memorie storiche di Montanaro, Tipografia Eredi Botta.

Battaglio, M. (2000). L'ultimo di Vittone, il Campanile di Montanaro nuovi rilievi e fonti d'archivio, Litoart.

Cavalli M., (1976). Tra Serra d'Ivrea Orco e Po, Istituto bancario San Paolo di Torino.

Bertolotti, A., (1867). Passeggiate nel Canavese, Tomo I, Ivrea, Tipografia di F. L. Curbis.

Pastore, S., Ronconi, R., (1998). Montanaro, edifici di matrice vittoniana della Confraternita di S. Giovanni e Marta: progetto di conservazione [Tesi di laurea magistrale in Architettura, Politecnico di Torino].

Austa, F., Dassetto, D., (2008). Il progetto di restauro di un'opera del tardo-barocco piemontese: palazzo bricca a montanaro [Tesi di laurea magistrale in Architettura, Politecnico di Torino]

Bartolozzi, C., Novelli, F., (2014). Castelli canavesani, Temi di restauro e valorizzazione, Aracne.

Olivero, E., (1920). Le opere di Bernardo Antonio Vittone, Architetto Piemontese del secolo XVIII, Torino, Tipografia del Collegio degli artigianelli.

GEOMATICA

Bottazzo, F., (2014). Applicazione della tecnologia LIDAR nell'analisi volumetrica di eventi di colate detritiche in ambiente alpino [Tesi di laurea magistrale, Università degli studi di Padova].

(n. d.) [Lezione "3D Metodologia parte 1: il 3D applicato all'analisi archeologica", Università degli studi di Ferrara].

Guarnieri, A., Remondino, F., Vettore, A., (2012). Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to cultural heritage 3D modelling

Bassanello, G., (2007). La tecnica del laser a scansione nel rilevamento di strutture: un caso di studio [Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile, Università di Bologna].

Marra, I., Ciampi, M., Minutolo, M., (2008). Un algoritmo per l'interpolazione e la fusione multimodale di immagini medicali tridimensionali, Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni.

Alp Stone, Manuale di Buone Pratiche per gli interventi di restauro conservativo degli edifici tradizionali della Provincia del Verbano Cusio Ossola e del Canton Ticino, Capitolo 2.3 e 2.4 - Metodi e strumenti per il rilievo dei tessuti edificati e Il rilievo metrico dei tessuti edificati.

Nyimbili, P. H., Demirel, H., Şeker, D.Z., Erden, T., (2016). *Structure from Motion (Sfm) – Approaches & Applications*, Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, International scientific conference on applied sciences, Turkey.

Zanni, S., De Rosa, A., Malaspina, M., Fortunati, M., (2014). Applicazioni di Structure from Motion (SFM) e realizzazioni di fotopiani georeferenziati nell'ambito dell'archeologia d'emergenza, 2014.

Bibliografia

Meli, P., (2015). La ricostruzione 3d in ambito archeologico e possibile utilizzo nel campo delle infrastrutture stradali: analisi delle potenzialità delle tecniche image-based [Tesi di dottorato, Università degli studi di Palermo].

Barrile, V., Bilotta, G., & Ricciardi, A., (2015). Computer vision/structure from motion per la diffusione dei beni culturali, Asita.

Accornero, A., (2018). Il rilievo sostenibile per il patrimonio edilizio a rischio: mobile mapping basato su tecnologia Slam [Tesi di laurea magistrale in Architettura].

Remondino, F., Nex, F., Sarazzi, D., (2011). Piattaforme UAV per applicazioni geomatiche, GEOmedia n.6.

Guerra, F., (2015). Utilizzo del drone per rilievi di piccole e medie dimensioni – esempi pratici.

Ferrante, F., C., Garnero G., I droni nelle applicazioni catastali: possibili impieghi, Agenzia delle Entrate, DIST - Università degli Studi e Politecnico di Torino.

Lo Brutto, M., (2015) I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università di Palermo.

Costa, E., Tecniche di rilievo digitale per la documentazione, lo studio e la fruizione di imbarcazioni lignee [Tesi di ricerca, Università Ca Foscari].

Iacob Ecaterina Geanina, (2019). Analisi delle metodologie e delle tecniche GNSS per il monitoraggio dei fenomeni franosi [Tesi di laurea magistrale in Ingegneria civile, Politecnico di Torino.

A. Manzino, (2000). Lezioni di Topografia, Parte III, strumenti e metodi di misura, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino, Otto.

Resta, F., (1999). [Lezioni di Topografia].

Bibliografia

Barisciani, N., (2019). Il posizionamento di precisione satellitare nell'era della multicostellazione e dei ricevitori GNSS a basso costo, valutazioni su precisioni ed accuratezze [Tesi magistrale in Ingegneria civile, Università degli studi di Bologna].

Goramasca M., (2004). Elementi di Geomatica, Associazione Italiana di Telerilevamento, Varese.

D'Apostoli, R., Giampaolo, F., (2018). Guida pratica al rilievo topografico con GPS e stazione totale, EPC.

GeCo, [Dispense, "Geomatics for conservation e communication of cultural heritage laboratory"].

Fichera., C. R., [Dispense, "Geomatica"].

Vettore A., Guarnieri, G., Pirotti, F., [Dispense, "Topografia"].

Mancini, F., (2013). Topografia e tecniche di rilevamento, Politecnico di Bari.

Sammartano, G., Previtali, M., & Banfi, F. (2021). Parametric generation in HBIM workflows for slam-based data: discussing expectations on suitability and accuracy.

Sammartano, G., & Spanò, A., Accornero, A., (2019). Scansioni laser basate su tecnologia SLAM per documentazione estensiva del convento di San Nicola a Tolentino. ATTI E RASSEGNA TECNICA. - ISSN 0004-7287. - 3(2019), pp. 217-221.

Chiabrando, F., Coletta, C.D., Sammartano, G., Spanò, A., & Spreafico, A. (2018). "Torino 1911" project: a contribution of a slam-based survey to extensive 3d heritage modeling. Isprs - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 422, 225-234.

Bibliografia

Chiabrando, F., Sammartano, G., Spanò, A., & Spreafico, A. (2019). Hybrid 3D Models: When Geomatics Innovations Meet Extensive Built Heritage Complexes. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 8, 124.

Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*, 10, 317-339.

Cannarozzo, Cucchiaroni, Meschieri, (2012). *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli editore.

Roggero, M., (2013). [Lezione "Tecniche fotogrammetriche per il rilievo"].

Garnero, G. (2015). *Fotogrammetria*.

Berti, C., (2011). [Lezione "Topografia e cartografia, Cenni di fotogrammetria"].

Taffurelli, L. (2018). [Lezione "Progetto prese fotografiche"].

Cera, V., (2018). Il rilievo dell'Architettura tra identificazione tipologica e strutturazione semantica. La Certosa di San Lorenzo a Padula nella rappresentazione digitale per il Cultural Heritage. [Dottorato di ricerca in architettura XXXI Ciclo, Università degli studi di Napoli Federico II].

Oniga, V.E., Pfeifer, N., & Loghin, A. (2018). 3D Calibration Test-Field for Digital Cameras Mounted on Unmanned Aerial Systems (UAS). *Remote. Sens.*, 10, 2017.

D'Eredità, A., (2020). Il rilievo fotogrammetrico di Doclea. *Archeologia e Calcolatori* n. XXXI.1.

Weber, H., (2018). Sick Ag Whitepaper. Funzionalità e varianti dei sensori lidar. Head of Product Unit Ranging LiDAR sensors presso SICK AG a Waldkirch.

Stylianidis, E., Remondino, F., (2016). *3D Recording, Documentation, And Management of Cultural Heritage*. Whittles Publishing.

Bibliografia

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., (2006). Close Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications.

BIM

Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., & Landes, T. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 46, 350-360.

Maiezza, P.: AS-BUILT RELIABILITY IN ARCHITECTURAL HBIM MODELING, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, 461–466, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-461-2019>, 2019.

Kjartansdóttir, I., Mordue, S., & Snæbjörnsson, J., (2017). Building Information Modelling – BIM.

Lo Turco, M., (2019). [Dispense Modellazione digitale parametrica B. “User Interface”].

Gatti, M., & Baraldi, D. (2007). Calibrazione di obiettivi amatoriali e rilevamento fotogrammetrico low cost. Geomedia.

Sitografia

<https://www.ceraunavoltailcanavese.com/montanaro-in-piazza>

[Home - Associazione Amici del Castello e Complesso Abbaziale di Fruttuaria \(amiciabbazia.it\)](#)

<https://docplayer.it/>

<https://www.geomaticaeconservazione.it/index.php#testo>

<https://www.ibm.com/topics/computer-vision>

[Geomatica UAV \(uavgeomatics.com\)](#)

[UAV - Rilievo aereo e ingegneria geomatica \(altigator.com\)](#)

[Indagine sui veicoli aerei senza equipaggio \(UAV\) - Challenger Geomatics](#)

[Funzionamento Di Un Brushless Camera Gimbal \(recensionidroni.com\)](#)

<https://www.ingegnerialoreti.it/stazione-totale-cosa-serve-come-funziona-strumento-topografico>

<https://labedil.altervista.org/topografia-4-cat/>

<https://3dmetrica.it/un-rilievo-fotogrammetrico-dalla-scala-di-rappresentazione/>

<https://www.tuttocauzioni.it/il-decreto-bim/bim-e-progettazione/>

<https://www.ltt.srl/news/attivita-formativa-bim-facility-management/>

<https://www.01building.it/bim/hbim-sfida-recupero-edifici-storici/>

<https://biblus.acca.it/come-il-bim-cambia-il-nostro-modo-di-lavorare/>

<http://www.bis-lab.eu/2017/02/28/bim-building-information-modeling-i-principi-di-una-rivoluzione/>

<https://www.ibimi.it/ifc-cose-e-come-e-fatto/>

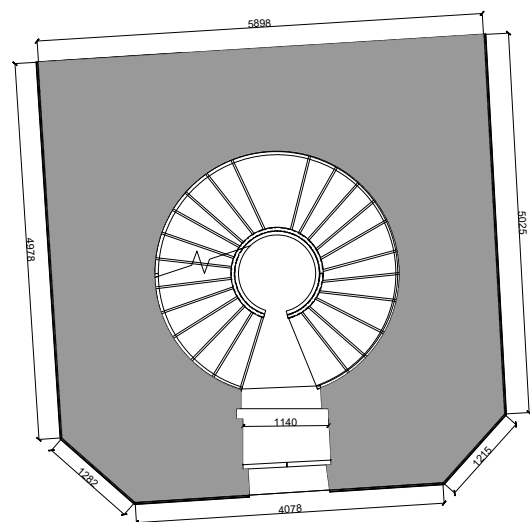
Sitografia

<https://it.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html#bu0ni74>

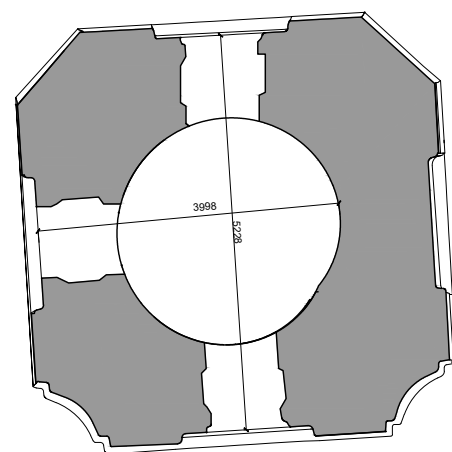
https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-31439-6_154

<https://it.qiq.wiki/wiki/IRNSS-1G>

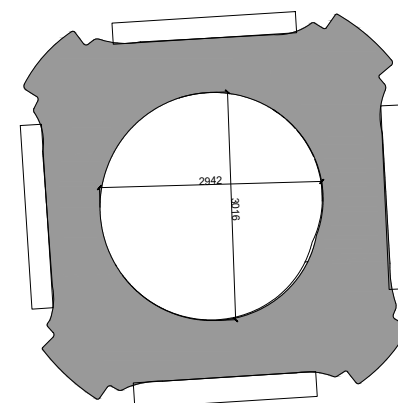
[IRNSS - Satellite Missions - eoPortal Directory](#)



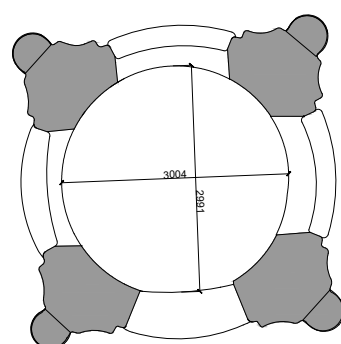
Pianta A - A'



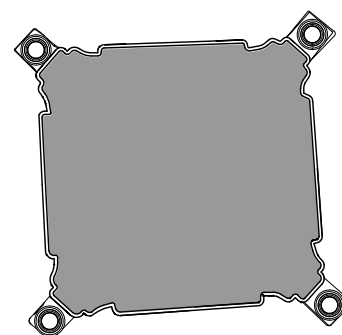
Pianta B - B'



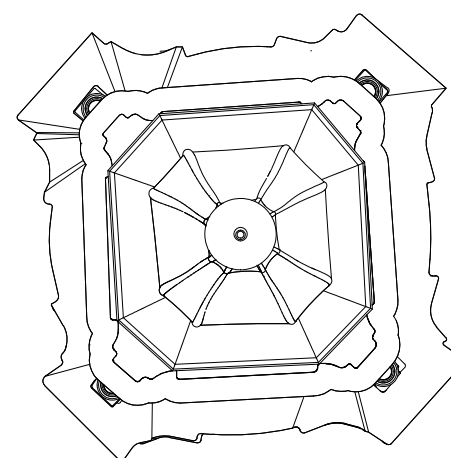
Pianta C - C'



Pianta D - D'



Pianta E - E'



Pianta F - F'

