

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

In

FOTOGRAMMETRIA APPLICATA M

**IL RILIEVO DELLA FACCIATA DELLA CHIESA DI SANTA
LUCIA A BOLOGNA, MEDIANTE SISTEMI
FOTOGRAMMETRICI A BASSO COSTO E OPEN SOURCE**

CANDIDATO:

Gaia Montanari

RELATORE:

Prof. Antonio Zanutta

CORRELATORE:

Ing. Valentina Alena Girelli

Anno Accademico 2014/2015

Sessione III

*Alla mia famiglia
E per non dimenticare
A Sonny e Gnugna*

ABSTRACT

Questo elaborato presenta una procedura di rilievo eseguito con la scansione Laser e la Fotogrammetria per lo studio della facciata della Chiesa di Santa Lucia in Bologna e le successive elaborazioni dei dati tramite software di correlazione automatica *Open Source* e commerciali *Low Cost* basati sui principi della *Structure from Motion*.

Nel particolare, il rilievo laser è stato eseguito da 5 posizioni diverse e tramite l'utilizzo di 7 target, mentre il rilievo fotogrammetrico è stato di tipo speditivo poiché le prese sono state eseguite solo da terra ed è stato impiegato un tempo di lavoro minimo (una decina di minuti).

I punti di appoggio per la georeferenziazione dei dati fotogrammetrici sono stati estratti dal datum fornito dal laser e dal set di fotogrammi a disposizione è stata ottenuta una nuvola di punti densa tramite programmi *Open Source* e con software commerciali. Si sono quindi potuti operare confronti tra i risultati ottenuti con la fotogrammetria e tra il dato che si aveva di riferimento, cioè il modello tridimensionale ottenuto grazie al rilievo laser.

In questo modo si è potuto verificare l'accuratezza dei risultati ottenuti con la fotogrammetria ed è stato possibile determinare quale calcolo teorico approssimativo dell'errore poteva essere funzionante per questo caso di studio e casi simili.

Inoltre viene mostrato come produrre un foto raddrizzamento tramite l'utilizzo di una sola foto utilizzando un programma *freeware*.

Successivamente è stata vettorializzata la facciata della chiesa ed è stata valutata l'accuratezza di tale prodotto, sempre confrontandola con il dato di riferimento, ed infine è stato determinato quale calcolo teorico dell'errore poteva essere utilizzato in questo caso.

Infine, avendo notato la diffusione nel commercio odierno della stampa di oggetti 3D, è stato proposto un procedimento per passare da una nuvola di punti tridimensionale ad un modello 3D stampato.

PAROLE CHIAVE

BENI CULTURALI

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

LASER SCANNER TERRESTRE

STAMPANTI 3D

STRUCTURE FROM MOTION

FOTO RADDRIZZAMENTO

SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
1. IL MODELLO DIGITALE TRIDIMENSIONALE	5
2. L'EVOLUZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA.....	13
2.1 FONDAMENTI ANALITICI.....	15
2.1.1. ORIENTAMENTO INTERNO DI UNA CAMERA METRICA.....	18
2.1.2. ORIENTAMENTO ESTERNO E RESTITUZIONE.....	24
2.1.3 TRIANGOLAZIONE FOTOGRAMMETRICA	26
2.2 FOTOGRAMMETRIA DIGITALE.....	28
2.2.1 CARATTERISTICHE DELLE IMMAGINI DIGITALI.....	28
2.2.2 TRATTAMENTO DELLE IMMAGINI DIGITALI	33
2.2.3 FORMATI DI MEMORIZZAZIONE DI IMMAGINI.....	37
2.2.4 ACQUISIZIONE DI IMMAGINI DIGITALI	39
2.2.5 LA CORRELAZIONE AUTOMATICA	42
2.2.5.1 CORRELAZIONE AREA BASED	45
2.2.5.2 CORRELAZIONE FEATURE BASED MATCHING.....	46
2.2.5.3 STRUCTURE FROM MOTION	47
3. IL LASER SCANNING TERRESTRE	53
3.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL LASER	54
3.2 CLASSIFICAZIONE	56
3.3 COMPORTAMENTO DEL LASER A CONTATTO CON I MATERIALI.....	59

3.4	SENSORI LASER SCANNER TERRESTRI.....	61
3.4.1	LASER SCANNER DISTANZIOMETRICI.....	62
3.4.1.1	DISTANZIOMETRI AD IMPULSI	63
3.4.1.2	DISTANZIOMETRI A MISURA DI FASE.....	66
3.4.2	LASER SCANNER TRIANGOLATORI	69
3.5	ACCURATEZZA.....	72
3.6	SCELTA DELLO STRUMENTO IN BASE ALLE ESIGENZE.....	75
3.7	TECNICHE DI RILEVAMENTO	83
3.8	TRATTAMENTO DEI DATI.....	87
4.	STAMPANTI 3D.....	91
4.1.	CAMPI DI UTILIZZO	93
4.2.	LE DIVERSE TECNOLOGIE DI STAMPA 3D.....	98
4.3.	ESEMPI DI STAMPANTI 3D.....	108
5.	CASO DI STUDIO: CHIESA DI SANTA LUCIA DI BOLOGNA.....	123
5.1.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	123
5.2.	EVOLUZIONE STORICA.....	125
5.3.	RILIEVO DELLA FACCIATA	136
5.3.1.	RILIEVO TLS	136
5.3.2.	RILIEVO FOTOGRAMMETRICO SPEDITIVO	144
6.	PROCEDURA DI ELABORAZIONE DEI DATI LASER.....	149
6.1.	FASI PRINCIPALI DELL'ANALISI	149
6.2.	ESTRAZIONE DEI PFA	156

7. LA RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA	
AUTOMATICA.....	159
7.1 SOFTWARE “LOW COST”	160
7.1.1. RESTITUZIONE VETTORIALE AUTOMATICA.....	161
7.1.2 CREAZIONE DELL’ORTOFOTO.....	177
7.2 SOFTWARE OPEN SOURCE	179
7.2.1 LA PROCEDURA PER OTTENERE UNA NUVOLA	
DI PUNTI GEOREFERENZIATA E SCALATA	180
7.3 TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI	195
7.4 FOTO RADDRIZZAMENTO E VETTORIALIZZAZIONE	203
7.4.1 FOTO RADDRIZZAMENTO	203
7.4.1.1 STRATEGIA ESEGUITA	206
7.4.2 VETTORIALIZZAZIONE.....	216
8. CONFRONTO FRA I MODELLI	225
8.1 VALUTAZIONE TEORICA DEGLI ERRORI NELLA	
RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA.....	225
8.2 VALUTAZIONE DELL’ACCURATEZZA DEI PRODOTTI	
OTTENUTI.....	233
8.2.1 PRODOTTI TRIDIMENSIONALI.....	233
8.2.2 PRODOTTI BIDIMENSIONALI	253
9. STAMPA 3D.....	265
CONCLUSIONI	279
BIBLIOGRAFIA.....	283
APPENDICE A.....	291
RINGRAZIAMENTI.....	333

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Strumentazioni applicate alle diverse scale di analisi per un intervento nell'ambito dei Beni Culturali (Bitelli; 2014).	6
Figura 2: La fotocamera digitale (a) e il laser scanner terrestre (b).	7
Figura 3: Descrizione dei principali <i>step</i> metodologici.....	8
Figura 4: Relazione fra le coordinate di punti immagine e punti oggetto (modificata da Kraus, 1994).	14
Figura 5: Sequenza delle tre rotazioni di un sistema di coordinate: primaria a), secondaria b), terziaria c) (modificata da Kraus, 1994).....	16
Figura 6: Centro di proiezione.	18
Figura 7: Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale. I punti nodali N, N' coincidono con i centri di prospettiva O, O' (modificata da Kraus, 1994).	19
Figura 8: Definizione del centro di prospettiva O' _M (modificata da Kraus, 1994).	20
Figura 9: Schema semplificato di foto-goniometro (modificata da Kraus, 1994).....	22
Figura 10: Assi della camera convergenti (a), paralleli (b) (modificata da Zanutta; 2015).	27
Figura 11: Formazione dell'immagine digitale (modificata da Zanutta; 2015).....	29
Figura 12: Contenuto metrico delle immagini digitali (modificata da Zanutta; 2015).	32
Figura 13: Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine Red Green Blue, diminuendo e aumentando la luminosità (Zanutta; 2015).....	36
Figura 14: Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine Red Green Blue, diminuendo e aumentando il contrasto (Zanutta; 2015).....	37
Figura 15: Immagine di un sensore CCD (a) e di un sensore CMOS (b) (modificata da Zanutta, 2015).	39
Figura 16: Conversione e trasferimento del segnale digitale nei sensore CCD (giallo) e CMOS (arancio) (modificata da Zanutta; 2015).....	39
Figura 17: Confronto tra CCD e CMOS (appunti digitali website).	41
Figura 18: Geometria epipolare (modificata da Zanutta; 2015).....	43
Figura 19: Vertical Line Locus (modificata da Zanutta; 2015).....	43

Figura 20: Approccio gerarchico: ogni livello ha dimensioni pari ad un quarto rispetto al precedente (modificata da Zanutta; 2015).....	44
Figura 21: Andamento del coefficiente di correlazione lungo una linea epipolare: il valore massimo della curva interpolatrice individua la posizione del punto omologo (modificata da Zanutta; 2015).....	46
Figura 22: Schema generale per un problema di Structure from Motion (modificata da Roncella; 2007).	47
Figura 23: a) regione omogenea (non ci sono variazioni in tutte le direzioni), b) edge (non ci sono variazioni lungo la direzione dell'edge), c) corner (ci sono variazioni significative in tutte le direzioni) (modificata da Zanutta; 2015).....	49
Figura 24: Ottava (modificata da Zanutta; 2015).....	50
Figura 25: Formazione istogramma di gradienti (modificata da Zanutta; 2015).	50
Figura 26: Esempio di creazione di un raggio laser.	55
Figura 27: Schematizzazione dello spettro elettromagnetico (Bornaz; 2006).....	56
Figura 28: Comportamento di una radiazione luminosa a contatto con un corpo grigio (Bornaz; 2006).	59
Figura 29: Comportamento riflettivo delle superfici (Bornaz; 2006).	61
Figura 30: Comportamento riflettivo delle superfici retro-riflettenti (Bornaz; 2006).....	61
Figura 31: Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico (Bornaz; 2006).....	62
Figura 32: Misura di distanza ad impulso (Bornaz; 2006).....	63
Figura 33: Misura del tempo trascorso.....	64
Figura 34: Misura del tempo t_a	65
Figura 35: Principio della misura della distanza per differenza di fase, caso con $D < \lambda/2$	67
Figura 36: Principio di funzionamento dell'intersezione in avanti in un laser a triangolazione (modificata da Bitelli; 2015).	69
Figura 37: Schema di funzionamento di un sensore a lama di luce.	71
Figura 38: Schema di funzionamento d un sensore a luce strutturata.	72
Figura 39: Obiettivo con scanalature di diversa larghezza per i test di risoluzione (Boheler e Marbs; 2006).....	73

Figura 40: Risultati del test ottenuti utilizzando lo stesso target a 6 m (a) e a 22 m (b). A sinistra viene mostrata la sezione trasversale della nuvola dei punti mentre a destra i punti rilevati sul piano posteriore del target (Boheler e Marbs; 2006).....	73
Figura 41: Test del laser sugli spigoli (Boheler e Marbs; 2006).	74
Figura 42: Camera Scanner (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).....	78
Figura 43: Panorama Scanner (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).	78
Figura 44: Scanner intermedio (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).....	79
Figura 45: Esempio di ambiente poco favorevole all'acquisizione (Bornaz; 2006).....	80
Figura 46: Alcuni modelli di Laser Scanner presenti in commercio: RIEGL 420i con fotocamera montata sul laser a tempo di volo (a), Trimble GX 3D Scanner (b), Faro LS 420 (c), Z+F Imageg 5006 (d), Leica Scan Station 2 (e), Topcon GLS 1000 (f), Optech ILRIS-3D (f) (modificata da Sgrenzaroli e Vassena; 2007).....	81
Figura 47: Esempio di acquisizioni (a parità di altre condizioni) effettuate a distanze di presa differenti (concetto di scala del rilievo) (Bornaz; 2006).	84
Figura 48: Procedimento di trattamento del dato laser (modificato da Bornaz; 2006).	87
Figura 49: Charles Chunck Hull.....	92
Figura 50: Adozione delle tecnologie di stampa 3D (Barnatt; 2013).	94
Figura 51: Stampa 3D più grande al mondo (Stampa 3D forum website).	95
Figura 52: Stampa 3D di un modello architettonico (Maietta; 2014).	95
Figura 53: Stampa 3D di una protesi a basso costo (Maietta; 2014).....	96
Figura 54: Un top stampato in 3D (Ceppi; 2012).....	97
Figura 55: Processo di stampa FDM.	100
Figura 56: Processo di stampa SLS (Kruth et al.; 2008).	101
Figura 57: Processo di stampa SLM (Ceppi; 2012).	103
Figura 58: Processo di stampa EBM.	104
Figura 59: Processo di stampa DLP.	105
Figura 60: Processo di stampa SLA (Ceppi; 2012).....	107
Figura 61: Stampante ZPrinter 310.	109
Figura 62: Esempio di un modello stampato.....	110

Figura 63: Stampante ZPrinter 250.	111
Figura 64: Esempio di un modello stampato.	112
Figura 65: Stampante ZPrinter 650.	113
Figura 66: Esempio di modelli stampati.	113
Figura 67: Stampante MakerBot Replicator.	114
Figura 68: Esempio di modello stampato prima della pulizia (a) e dopo la rimozione del raft (b).	115
Figura 69: Stampante MakerBot Replicator Z18.	116
Figura 70: Stampante DeltaWASP 2040 Turbo.	117
Figura 71: Stampante DeltaWASP 60100.	118
Figura 72: Esempio di un modello stampante.	119
Figura 73: Stampante BigDelta.	120
Figura 74: Particolare della stampa 3D.	121
Figura 75: Inquadramento territoriale del comune di Bologna (in rosso) (Provincia di Bologna website).	123
Figura 76: Inquadramento territoriale dell'ex chiesa di Santa Lucia (Google Maps website)..	124
Figura 77: Facciata odierna dell'ex chiesa di Santa Lucia.	124
Figura 78: Analisi delle fasi di accrescimento degli insiemi architettonici e monumentali dal 1575 al 1843 dell'area (Scannavini; 1988).	125
Figura 79: Vista dall'alto del tracciato di Via Castiglione. L'andamento irregolare sottolinea il percorso dell'antico canale (Scannavini; 1988).	126
Figura 80: La vecchia chiesa, il collegio e le case adiacenti prima del 1623 (Scannavini; 1988).	127
Figura 81: Progetto per Santa Lucia eseguito ma mai realizzato da Giovanni Battista Aleotti nel 1621 (Scannavini; 1988).	128
Figura 82: Progetto della facciata, secondo il progetto di Girolamo Rainaldi, mai realizzato (Scannavini; 1988).	128
Figura 83: Rilievo del piano terreno del complesso monumentale della chiesa, congregazioni, collegi, scuole dei Gesuiti compreso tra le vie Castiglione, Cartolerie, de' Chiari (Scannavini; 1988).	130

Figura 84: La navata della chiesa trasformata in palestra per la Virtus nel 1873 (Scannavini; 1988).	131
Figura 85: La facciata della chiesa in una suggestiva immagine degli anni trenta (Archivio storico website).	132
Figura 86: Stati di degrado di un altare e di un cupolino della navata laterale (Archivio storico website).	132
Figura 87: Cantiere per il restauro della navata principale (Archivio storico website).....	133
Figura 88: Altare e cupolino di una navata dopo il restauro (Archivio storico website).	134
Figura 89: Vista dell'abside seicentesca incompiuta (Scannavini; 1988).	134
Figura 90: Navata principale dopo il restauro (Scannavini; 1988).....	135
Figura 91: Abside seicentesca dopo il restauro (Archivio storico website).	135
Figura 92: Monografia della piazzetta con il posizionamento dei target (rettangoli) e delle stazioni di scansione laser (cerchi).....	137
Figura 93: Posizionamento dei target: target_largo (a), target_gronda_sx (b), target_sl (c), target_gronda_dx (d), target_gronda_lat (e), target_avv (f), target_gronda_ret (g).....	138
Figura 94: Laser RIEGL VZ400.	139
Figura 95: Canon EOS 6D (Canon website).	144
Figura 96: Schema della geometria di presa eseguita da terra. Le frecce indicano dove sono state eseguite le fotografie e in quali direzioni mentre in rosa è mostrata la facciata della chiesa di Santa Lucia.....	146
Figura 97: Cattura dei fotogrammi non corretto (a) e corretto (b).	147
Figura 98: Schema prospettico e planimetrico della presa normale con assi della camera paralleli e perpendicolari alla base di presa.....	147
Figura 99: Schema della presa ad assi inclinati e paralleli.....	148
Figura 100: Nuvole disallineate: nuvola scansione centrale in colore magenta e nuvola scansione sinistra in color ciano.	151
Figura 101: Allineamento delle nuvole con il trascinarsi dei target della scansione di sinistra (a sinistra) nella scansione globale (a destra). Oltre ai 7 target c'è la presenza di due punti naturali necessari a causa della scarsa visibilità dei alcuni <i>marker</i>	151
Figura 102: Deviazione standard e matrice di rototraslazione.	152

Figura 103: Nuvole allineate.....	152
Figura 104: Mancanza del dato fotografico.	153
Figura 105: Nuvola densa di punti ottenuta dal rilievo TLS. Ogni punto restituito è corredato da un valore radiometrico ricavato dalle immagini sincrone acquisite dalla camera digitale montata sopra il Laser. I punti sono definiti in un sistema di coordinate cartesiano ortogonale locale orientato lungo la verticale.....	155
Figura 106: Add Reference Point, comando di estrazione delle coordinate di punti dalla nuvola densa in ambiente <i>Rapidform XOR3 64</i> (Rapidform website).	156
Figura 107: Posizione approssimata dei punti fotogrammetrici di appoggio.....	157
Figura 108: Fotogrammi con presa frontale.	161
Figura 109: Fotogrammi di dettaglio con presa da sinistra verso destra.	161
Figura 110: Fotogrammi di dettaglio con presa da destra verso sinistra.	162
Figura 111: Pianta (a) e prospetto (b) delle posizioni di presa. In verde viene mostrata la presa “frontale”, in blu la presa di “dettaglio da sinistra a destra” e in azzurro la presa di “dettaglio da sinistra a destra”.	163
Figura 112: Immagine originale (a) e creazione della sua mask (b)	164
Figura 113: Mask con presa frontale.....	165
Figura 114: Mask di dettaglio con presa da sinistra verso destra.....	165
Figura 115: Mask di dettaglio con presa da destra verso sinistra.....	165
Figura 116: Ground Control Settings.	166
Figura 117: Align Photos.	167
Figura 118: Risultato ottenuto con Align Photos.	168
Figura 119: Nuvola sparsa dell’intera facciata.....	169
Figura 120: Nuvola sparsa della sommità della chiesa.	169
Figura 121: Nuvola sparsa della base della chiesa.	170
Figura 122: Build Dense Cluod.....	170
Figura 123: Nuvola densificata	171
Figura 124: Build Mesh.....	172
Figura 125: Nuvola densa della facciata in prospettiva.	172

Figura 126: Vista centrale della facciata.....	173
Figura 127: Dettaglio della parte inferiore della facciata.....	173
Figura 128: Nuvola densa del prospetto frontale della facciata.	174
Figura 129: Build Texture.....	175
Figura 130: Nuvola densa texturizzata.....	175
Figura 131: Dettaglio della facciata alla base.	176
Figura 132: Dettaglio del portone principale texturizzato.....	176
Figura 133: Esportazione dei punti della nuvola densa.....	177
Figura 134: Generazione di un'ortofoto.....	178
Figura 135: Creazione dell'ortofoto, cioè una fotografia geometricamente corretta e georeferenziata, tramite Agisoft Photoscan.....	178
Figura 136: Errore di VisualSfM con l'utilizzo di fotogrammi ad alta definizione (VisualSfM website).	182
Figura 137: Immagini utilizzate.	183
Figura 138: Lettura dell'immagine caricata.	183
Figura 139: Confronto tra fotogrammi per la ricerca di corrispondenze.....	183
Figura 140: File SIFT.....	184
Figura 141: Ricostruzione sparsa attraverso la triangolazione e il Bundle Adjustment.....	184
Figura 142: Ricostruzione automatica della struttura della scena. Viene ricostruita la geometria di presa e viene mostrato che le immagini sono state prese a distanza diversa.....	185
Figura 143: Visualizzazione tridimensionale densa.	186
Figura 144: Ricostruzione automatica della struttura della scena. Viene ricostruita la geometria di presa e viene mostrato che le immagini sono state prese a distanza diversa.....	187
Figura 145: Visualizzazione tridimensionale densa.	188
Figura 146: Comandi GCP-based Transformation.....	189
Figura 147: Registrazione delle coordinate dei punti.....	189
Figura 148: Visualizzazione dei target.....	190
Figura 149: Parametri della trasformazione conforme con S fattore di scala, R i parametri di rotazione e T i parametri di traslazione.	190

Figura 150: Visualizzazione tridimensionale ottenuta con immagine non rettificata (a) e con immagini rettificate (b).....	193
Figura 151: Nuvola densa di punti.	197
Figura 152: Nuvola pulita dopo la pulizia.....	198
Figura 153: Nuvola densa di punti.	199
Figura 154: Interfaccia Label Connected Components.....	200
Figura 155: Vista dei componenti creati dall'algoritmo <i>Label Connected Components</i>	201
Figura 156: Scomposizione in gruppi di punti.	201
Figura 157: Nuvola dopo la pulizia.....	202
Figura 158: Esempio di un foto raddrizzamento.....	203
Figura 159: Il principio del ricampionamento in un'immagine applicato al raddrizzamento digitale. a) l'immagine raddrizzata; b) l'immagine originale. Nota la relazione geometrica tra le due immagini (omografia), il valore radiometrico di ogni pixel viene ricavato dall'immagine originale mediante algoritmi di ricampionamento.	205
Figura 160: Interfaccia iniziale.	206
Figura 161: Fotografia iniziale.....	206
Figura 162: Caricare l'immagine iniziale.....	207
Figura 163: Coordinate immagine visualizzate nella barra di stato.	207
Figura 164: Visualizzazione del navigatore.	207
Figura 165: Visualizzazione dello zoom.	208
Figura 166: Dimensioni area di ricampionamento.....	213
Figura 167: Scala dell'immagine corretta.	213
Figura 168: Immagine raddrizzata.	215
Figura 169: Creazione di un nuovo layer.....	217
Figura 170: Restituzione dell'oggetto.	218
Figura 171: Prima suddivisione dei layer.....	219
Figura 172: Restituzione al tratto della facciata della chiesa. Le linee di diverso colore identificano discontinuità e elementi descritti nel testo.	221
Figura 173: Particolare della colonna a destra del portone principale e relativa legenda.	222

Figura 174: Particolare della parte destra in basso della facciata e relativa legenda.....	224
Figura 175: Rappresentazione dell'errore che viene introdotto ipotizzando l'oggetto piano. ..	229
Figura 176: Livelli di profondità della chiesa.	230
Figura 177: Principio di funzionamento dell'algoritmo M3C2. Viene mostrato il principio dell'algoritmo M3C2 (a) in cui vengono rappresentati i due step: il calcolo della normale alla scala D attorno ai <i>core point</i> (step 1) e la media della distanza tra le due nuvole a scala d lungo la normale (step 2); e l'uso dell'algoritmo su una superficie complessa (b) (Lague et al; 2013).	234
Figura 178: Calcolo della distanza tra le due nuvole di punti (Laser-Visual).....	236
Figura 179: Istogramma delle frequenze. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che il maggior numero di zone è caratterizzato dal colore verde (cioè un errore nell'ordine del millimetro), una buona parte è caratterizzata dal colore giallo (cioè nell'ordine del centimetro) mentre le zone blu e rosse (cioè nell'ordine di qualche centimetro) caratterizzano zone molto inferiori rispetto a quelle precedentemente descritte. ..	237
Figura 180: Distribuzione Gaussiana. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è la presenza di un <i>bias</i> pari a 15 mm.....	237
Figura 181: Calcolo della distanza tra le due nuvole di punti (Laser-Agisoft).	238
Figura 182: Istogramma delle frequenze. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che il maggior numero di zone è caratterizzato dal colore verde (cioè un errore nell'ordine del millimetro), una buona parte è caratterizzata dal colore arancio (cioè nell'ordine del centimetro) mentre la zone blu (cioè nell'ordine di qualche centimetro) caratterizza zone molto inferiori rispetto a quelle precedentemente descritte.	239
Figura 183: Distribuzione Gaussiana. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che non ci sia la presenza di un <i>bias</i> come accaduto con il software open source.....	239
Figura 184: Numero punti ottenuti con il Laser. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti.	241

Figura 185: Frequenza dei valori ottenuti con il Laser. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che la mole di punti fino a 4000 è alta mentre le zone in cui si hanno 6000 punti sono poche.	242
Figura 186: Numero punti ottenuti con Visual SfM. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti. In questo caso sono presenti delle zone dove non c'è la presenza di punti (soprattutto nella sommità).	242
Figura 187: Frequenza dei punti ottenuti tramite VisualSfM. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che la mole di punti fino a 1000 è alta mentre le zone in cui si hanno 3000 punti sono poche.	243
Figura 188: Numero punti ottenuti con Agisoft Photoscan. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti.	244
Figura 189: Frequenza di punti ottenuti con Agisoft Photoscan. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che le zone in cui si hanno pochi punti sono scarse, la zona in cui la mole di punti è pari a 2000 è alta mentre le zone in cui si hanno 6000 punti sono poche.	245
Figura 190: Inquadramento sezioni e particolari.....	246
Figura 191: Sezione O2, dettaglio 4 della sezione O2 (a) e immagine dell'oggetto reale (b). .	247
Figura 192: Sezione O3, dettaglio 1. Visualizzazione degli artefatti creati tramite il laser (rosso).	247
Figura 193: Sezione O3, dettaglio 2. Visualizzazione degli artefatti creati tramite il laser (rosso).	247
Figura 194: Sezione V2, dettaglio 5. Visualizzazione dei mattoncini perfettamente restituiti con il laser (rosso) e della rientranza della finestra rappresentata anche tramite la fotogrammetria (giallo).	248
Figura 195: Sezione V2, dettaglio 3 (a) e immagine dell'oggetto reale (b).	249
Figura 196: Sezione O2, dettaglio 4.	250
Figura 197: Sezione O3, dettaglio 1.	250

Figura 198: Sezione O3, dettaglio 2.....	250
Figura 199: Sezione V2, dettaglio 5 (a) e sezione V2, dettaglio 3 (b).	251
Figura 200: Posizione approssimata dei punti che servono per la valutazione dell'accuratezza del prodotto ottenuto.	253
Figura 201: Monografia dei <i>check point</i> : punto 0 (a), punto 1 (b), punto 2 (c), punto 3 (d), punto 4 (e).	254
Figura 202: In arancio vengono mostrate le distanze trovate direttamente sul foto raddrizzamento.....	255
Figura 203: Distribuzione dei punti su cinque livelli differenti della facciata.	258
Figura 204: Monografia dei punti 0 (a), 1 (b) e 2 (c) che appartengono ad un piano pari a 2 metri circa di sporgenza.....	259
Figura 205: Monografia dei punti 3 (a), 4 (b) e 5 (c) che appartengono ad un piano pari a 0.7 cm circa di sporgenza.....	259
Figura 206: Monografia dei punti 6 (a), 7 (b) e 8 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.05 cm circa di sporgenza.....	260
Figura 207: Monografia dei punti 9 (a), 10 (b) e 11 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.27 cm circa di sporgenza.....	261
Figura 208: Monografia dei punti 12 (a), 13 (b) e 14 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.6 cm circa di sporgenza.....	261
Figura 209: Superficie ottenuta con <i>Agisoft Photoscan</i> (a) e realizzazione di uno spessore andando così a creare un volume con <i>Rapidform XOR3 64</i> (b).	266
Figura 210: Impostazione delle posizioni per la stampa. Per ottenere un modello leggermente più grande sono stati importati due file dello stesso tipo e sono stati inseriti di sbieco. Inoltre in basso a sinistra si nota una freccia gialla che rappresenta la posizione nella quale il modello viene stampato. In questo modo il modello tridimensionale viene stampato in due parti.....	267
Figura 211: Estrazione del modello dalla stampante. Come si può notare esso è ricoperto dalla polvere di gesso.....	268
Figura 212: Processo di pulizia del modello tramite una pistola ad aria compressa per poter rimuovere le piccole porzioni di polvere rimaste.....	268
Figura 213: Modello ottenuto dopo la pulizia.....	269
Figura 214: Particolare del portone principale alla base della facciata.....	269

Figura 215: Risultato dopo la resinatura. Il materiale è stato reso più robusto rispetto a prima.	270
Figura 216: Prodotto finale ottenuto con una procedura di sabbiatura per rendere il materiale leggermente meno lucido e successivo incollaggio delle due parti. Questo modello mostra la chiesa nell'interezza senza rappresentare nel dettaglio le tipologie murarie che lo caratterizzano.	271
Figura 217: In azzurro viene rappresentata la superficie e in giallo il piano creato per poter creare un volume.	273
Figura 218: Volume finale ottenuto grazie all'unione delle due superfici.	273
Figura 219: Impostazione delle posizioni per la stampa.	274
Figura 220: Prodotto appena stampato con ancora della polvere insediata.....	275
Figura 221: Prodotto ottenuto dopo la pulizia dalla polvere tramite la pistola ad aria compressa.	275
Figura 222: Prodotto ottenuto dopo la resinatura con cianacrilato per ottenere un modello costituito da un materiale meno fragile.	276
Figura 223: Particolare del modello stampato, visto frontalmente (a) e visto dall'alto (b). Come si può notare tramite questa stampa dettagliata è possibile vedere la tessitura muraria e i fori presenti nella facciata.	277
Figura 224: Prodotto finale ottenuto mediante la procedura di sabbiatura per rendere il materiale leggermente meno lucido.	277
Figura 225: Prodotti ottenuti tramite la stampa 3D, la facciata nel complesso a sinistra e il particolare del portone a destra.	278

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Vari tipi di immagini digitali in relazione al proprio contenuto radiometrico (DN) (modificata da Zanutta; 2015).	30
Tabella 2: Caratteristiche di alcuni laser scanner in commercio (modificata da Sgrenzaroli e Vassena; 2007).	82
Tabella 3: Caratteristiche e applicazioni del laser RIEGL VZ-400 (modificato da Rielg website).	140
Tabella 4: Scheda tecnica RIEGL VZ400.	141
Tabella 5: Caratteristiche sensore immagine Canon EOS 6D.	145
Tabella 6: Dettagli del rilievo effettuato.	162
Tabella 7: Errore nell'ordine del centimetro fornito da Agisoft Photoscan.	167
Tabella 8: Comandi principali di VisualSfM.	181
Tabella 9: Tempo impiegato.	186
Tabella 10: Tempo impiegato.	188
Tabella 11: Calcolo dei residui e della media	191
Tabella 12: Caratteristiche delle due prove effettuate.	194
Tabella 13: Tabella coordinate oggetto.	209
Tabella 14: Tabella coordinate immagine.	210
Tabella 15: Tabella coordinate unione.	211
Tabella 16: Tabella per il calcolo dei residui.	212
Tabella 17: Dettagli rilievo effettuato.	226
Tabella 18: Accuratezza calcolata con vari metodi per il modello tridimensionale.	228
Tabella 19: Fattore di scala alla base e in sommità per il modello bidimensionale.	229
Tabella 20: Profondità, distanza di presa e fattore di scala relativo alle cinque diverse rientranze.	231
Tabella 21: Accuratezza per il modello bidimensionale.	232
Tabella 22: Coordinate dei check point.	255
Tabella 23: Distanze e residui	256

Tabella 24: Misure di altezza e larghezza della facciata.	256
Tabella 25: Stima dei valori massimi e minimi, della media e dello scarto quadratico medio.	257
Tabella 26: Coordinate dei punti.	262
Tabella 27: Distanze 3D, 2D e residui.	263
Tabella 28: Stima dei valori massimi e minimi, della media e dello scarto quadratico medio.	263

INTRODUZIONE

L'avvento e la diffusione di fotocamere digitali e di nuove tecnologie nell'ultimo decennio hanno permesso alla fotogrammetria di mettere a punto innovazioni nelle tecniche di rilievo metrico digitale per la realizzazione di modelli geometrici tridimensionali dettagliati nel campo architettonico dei Beni Culturali.

In questo elaborato viene descritta una procedura per lo studio della facciata della Chiesa di Santa Lucia in Bologna in Emilia-Romagna grazie all'esecuzione di un rilievo fotogrammetrico speditivo e uno eseguito con scansione laser.

L'obiettivo di questa tesi riguarda la realizzazione di modelli tridimensionali e bidimensionali a basso costo ottenuti tramite un semplice rilievo Fotogrammetrico Terrestre e il confronto con il modello tridimensionale ottenuto con il Laser Scanner Terrestre. Il secondo tipo di rilievo è molto più dispendioso rispetto al primo e lo scopo risulta quindi dimostrare se è possibile utilizzare una forma di rilievo costoso o basti essere in possesso di una macchina fotografica per ottenere un modello che si possa considerare accettabile.

Quindi vengono proposte una serie di fasi che permettano di passare da un database non strutturato alla ricostruzione della scena tridimensionale tramite l'utilizzo di software open source e commerciali con implementati algoritmi di correlazione automatica.

Inoltre vengono descritte le fasi che servono per creare un fotopiano, cioè un'immagine raddrizzata consultabile metricamente, scattando semplicemente una fotografia e la sua successiva vettorializzazione.

Avendo un riferimento metrico accurato, dato dalla nuvola di punti scansionata con il laser scanning, si procede con la validazione o meno del calcolo dell'errore teorico sia per il caso tridimensionale che per quello bidimensionale.

Infine viene descritta la procedura per poter passare da una nuvola densa di punti ad un modellino stampabile grazie all'utilizzo della Stampante 3D.

Questa tesi risulta sostanzialmente strutturata in due parti. In un primo momento si cerca di dare una serie di nozioni e informazioni relative alle tecniche di rilievo esistenti per quanto riguarda il monitoraggio dei beni culturali; inoltre viene descritta la tecnica della stampa 3D che è oggi estremamente diffusa in moltissimi campi di applicazione. Nella seconda parte invece viene esplicitato il caso oggetto di studio: la facciata della Chiesa di Santa Lucia in Bologna, ora sede dell'Aula Magna dell'Università. Viene descritto il rilievo eseguito sia con il Laser che tramite la Fotogrammetria e la fase sperimentale di elaborazione dei dati laser e fotogrammetrici tramite software open source e commerciali. Infine vengono rappresentati i prodotti ottenuti e i confronti realizzati, soffermandosi sulle problematiche e funzionalità.

Nello specifico la struttura è la seguente:

- Il primo capitolo affronta la tematica del modello digitale tridimensionale, che sta avendo un gran successo non solo nell'ingegneria ma anche nella medicina, nell'archeologia, ecc. In particolare verranno descritti gli scopi per cui esso viene utilizzato.
- Nel secondo e terzo capitolo vengono esposte le tecniche e le metodologie di rilievo applicate all'oggetto nel caso di studio quali la Fotogrammetria e il Laser Scanner Terrestre. In particolare la fotogrammetria viene descritta a partire dai fondamenti analitici fino a giungere alla fotogrammetria digitale con lo sviluppo di algoritmi di correlazione automatica.
- Nel quarto capitolo viene esposta la nuova tecnologia di stampa 3D. Vengono descritti i principi di funzionamento e riportati alcuni esempi delle stampanti presenti in commercio.
- Nel quinto capitolo viene descritto il caso oggetto di studio tramite un inquadramento geografico, la storia e il rilievo della facciata, eseguito sia con la scansione laser sia con la fotogrammetria.
- Nel sesto capitolo viene riportata l'elaborazione dei dati post rilievo ottenuti con il laser e l'estrazione dei punti fotogrammetrici di appoggio necessari per la georeferenziazione dei dati fotogrammetrici.

- Nel settimo capitolo viene descritta la procedura di elaborazione dei dati fotogrammetrici fino alla realizzazione della nuvola tridimensionale e la procedura del foto raddrizzamento e vettorializzazione del fotopiano.
- Nell'ottavo capitolo viene valutata l'accuratezza dei modelli tridimensionali ottenuti con la fotogrammetria terrestre e del foto raddrizzamento realizzato.
- Nel nono capitolo viene mostrato il modellino tridimensionale della facciata della chiesa realizzato tramite la stampante 3D nel laboratorio SiLab del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna con la relativa procedura da utilizzare per passare da una nuvola di punti densa tridimensionale ad un modello stampato.

1. IL MODELLO DIGITALE TRIDIMENSIONALE

La geomatica ha fatto grandi progressi in vari ambiti ed oggi offre molteplici soluzioni per il rilievo dei Beni Culturali. Lo sviluppo tecnologico e informatico ha consentito un radicale cambiamento dei sistemi di acquisizione e dei software di elaborazione dati, consentendo di ottenere informazioni tridimensionali sempre più precise e ricche, coinvolgendo un numero sempre maggiore di discipline e ambiti applicativi, quali quello ambientale, strutturale, industriale, medico, archeologico, forense, museale, ecc., con ulteriori prospettive di allargamento per quanto riguarda la natura ed il numero delle realizzazioni. Grazie ad un elevato livello di automazione, oggi è possibile determinare con facilità e rapidità la posizione di una densa quantità di punti; ciò è reso possibile da numerosi strumenti e metodologie, andando dal più sofisticato e preciso laser scanner alla più economica fotogrammetria digitale.

Il campo dei Beni Culturali sta vivendo una fase di promozione e valorizzazione del proprio patrimonio anche per l'accessibilità di diverse tecniche di documentazione e rilievo e l'innovativo utilizzo di strumenti di conoscenza, promozione e comunicazione di tipo multimediale (Figura 1). Viene posta ormai sempre maggiore attenzione alla documentazione metrica digitale accurata di siti archeologici, centri storici cittadini, complessi edificati d'importanza storico-architettonica, reperti archeologici; si è quindi andata sempre più diffondendo l'idea che la conoscenza di un bene non può riguardare solo la sua storia artistica, ma deve necessariamente comprendere anche le sue caratteristiche di posizione, forma e geometria.

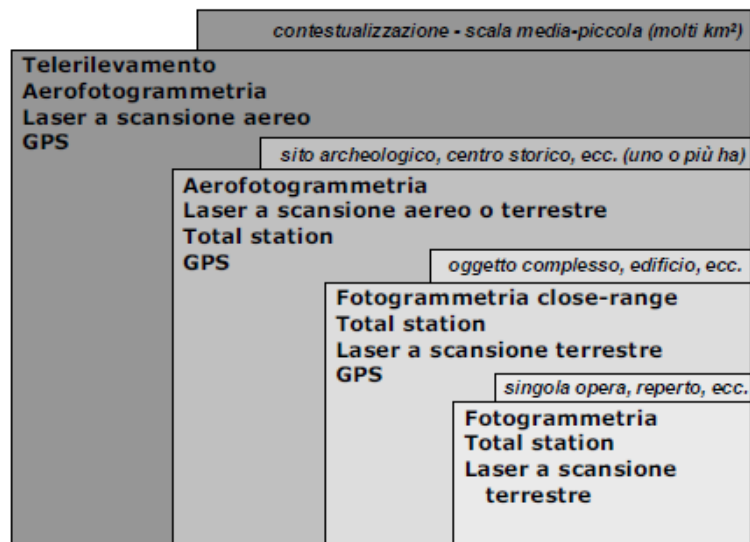


Figura 1: Strumentazioni applicate alle diverse scale di analisi per un intervento nell'ambito dei Beni Culturali (Bitelli; 2014).

Questo campo è quello che più degli altri si presta ad un approccio complementare e integrato di tecniche e tecnologie diverse, tutte di grande interesse e in continuo sviluppo; in primo luogo perché in questo settore ogni situazione costituisce un caso a sé, con le proprie caratteristiche, problematiche e specificità, che spesso costringono ad abbandonare i classici schemi ed approcci del rilievo per cercare soluzioni nuove e diversificate; in secondo luogo qualunque bene per poter essere correttamente studiato e compreso non va considerato solo come singola entità, ma va inserito nel contesto territoriale in cui si trova e questo costringe spesso ad adottare un approccio multidisciplinare e multi-scala, che partendo dal rilievo del territorio arriva fino al singolo reperto, ponendo per ogni fase problematiche diverse, che richiedono strumentazioni distinte e che operano con precisioni non omogenee e differenti sistemi di riferimento, ma che devono alla fine riuscire a coesistere e comunicare; in terzo luogo questo è un settore che interessa moltissime aree di studio, dall'archeologia all'architettura, dalla storia all'arte, dal rilevamento alle scienze strutturali, ed ogni studioso ha le proprie esigenze in termini di procedure, dati di partenza, conoscenze necessarie e prodotti finali ottenibili, ma tutte queste aree di studio devono riuscire in qualche modo a colloquiare tra loro.

Nello stesso tempo l'incessante evolversi di questi strumenti e metodologie ha inevitabilmente imposto un approccio diverso nel settore della conoscenza e documentazione dell'architettura.

Un'altra caratteristica che favorisce l'utilizzo di questi nuovi approcci è rappresentata dalla maneggevolezza e dalle ridotte dimensioni della strumentazione. Per quanto riguarda l'uso della fotogrammetria digitale è possibile operare anche con strumenti molto economici, quali le camere digitali a medio-basso costo, fino alla fotocamera del proprio *smartphone* (considerando la qualità delle foto ottenute, che potranno, utilizzando opportuni accorgimenti in fase di rilievo, garantire comunque dei risultati in gran parte soddisfacenti).

Inoltre con l'introduzione di nuovi dispositivi di misura come il laser scanner terrestre e tecniche di rilievo come la fotogrammetria digitale (Figura 2), diventata automatica grazie al miglioramento degli algoritmi di correlazione (*image matching*) ibridati con la *Computer Vision* (si veda ad esempio *Structure from Motion*), si è verificato un allargamento esponenziale dell'utenza di tali tecniche geomatiche di rilievo diventate alla portata anche di personale non tecnico.

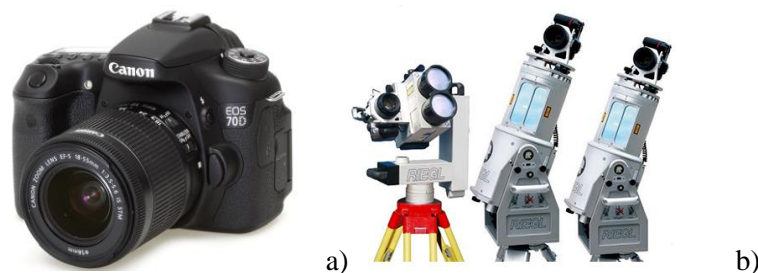


Figura 2: La fotocamera digitale (a) e il laser scanner terrestre (b).

Significativo risulta essere l'evoluzione del concetto di modello digitale tridimensionale: il modello non è più solamente una rappresentazione foto-realistica del costruito inteso come *output* di un processo conoscitivo quanto un nuovo mezzo di conoscenza ed interfaccia intuitiva di nuove strutture conoscitive quali database 3D (Figura 3).



Figura 3: Descrizione dei principali *step* metodologici.

Il modello digitale diventa così uno strumento operativo, indispensabile ed implementabile di nuovi sistemi informativi che permettono di gestire strutture di dati complessi e tipologicamente eterogenei (testi, immagini, video, disegni 2D) dalla scala del singolo edificio fino a quella geografica.

La documentazione del bene architettonico e archeologico sia esso di tipo bidimensionale o tridimensionale non può più fare a meno degli strumenti messi a disposizione dalle tecniche digitali. Districarsi tra le diverse tecnologie a disposizione è opera ardua, soprattutto se l'obiettivo è quello della condivisione di metodi e tecniche. Alle attività di produzione di documenti si affianca costantemente anche quella di definizione di nuovi standard e formati digitali di scambio e condivisione dati. C'è da considerare anche che il livello di accessibilità dei documenti aumenta a dismisura: manoscritti antichi difficilmente consultabili perché conservati in teche o in ambienti non aperti al pubblico; beni architettonici/ archeologici difficilmente raggiungibili perché in luoghi impervi o in regioni del mondo politicamente instabili; opere di cui si

dispone della sola documentazione storica perché ormai scomparse; progetti mai realizzati. Tutti questi beni acquistano nuova vita e diventano raggiungibili dal grande pubblico grazie alla digitalizzazione dei documenti e alla creazione di fedeli ricostruzioni virtuali. La digitalizzazione dei documenti oltre ad ampliare lo spettro delle modalità di analisi grazie a evoluti strumenti di catalogazione dati, offre la possibilità all'utente di avere un sempre più accurato e diretto rapporto con le opere, inoltre i nuovi strumenti di interazione e visualizzazione garantiscono un maggior coinvolgimento dell'utente. Pensare alla possibilità di utilizzare questi sistemi per riprodurre l'architettura, insieme alle sue espressioni, colori, spazi, volumi ha ampliato la visione della ricerca presentata. In particolar modo affascina l'idea di poter riprodurre scene reali, di portare spazi e prospettive lontane in un luogo diverso. L'operazione è però molto più complessa quando si parla di riprodurre il reale, operazione che presuppone la ricostruzione di modelli tridimensionali partendo da operazioni di rilievo.

In ambito architettonico, laddove l'oggetto di studio sia costituito da un edificio storico, si può dire che il rilievo serve principalmente per la progettazione di interventi conservativi di restauro e costituisce il supporto dimensionale per quelle ricerche preliminari che si attuano in relazione ad una corretta progettazione, quali indagini strutturali, quadro delle lesioni, conoscenza dell'impianto geometrico originale, analisi della verticalità e orizzontalità delle strutture, ecc.

Oltre al rilievo di grandi edifici, il rilievo e la modellazione tridimensionale coinvolgono lo studio, con alto livello di dettaglio, di oggetti di dimensioni che variano da qualche decina a pochi centimetri. Un esempio immediato è quello fornito dal rilievo di reperti archeologici, ma nell'ambito del restauro, dell'analisi dei materiali, delle indagini non distruttive, le potenzialità sono di grandissimo interesse. Comunemente, fino a poco tempo fa, e soprattutto in ambito museale, la documentazione geometrica di un bene culturale mobile di piccole dimensioni si è limitata ad una rappresentazione fotografica, riportante magari elementi metrici minimali, come un righello posto di fianco all'oggetto, in grado di fornire una scala di lettura. Ciò che si è in genere tenuto in scarsa considerazione, ma in grado invece di dare al contenuto informativo quel qualcosa in più rispetto alla semplice fotografia, è l'adozione di metodologie per un rilievo rigoroso e metrico, metodologie che possono essere di grandissimo interesse non

solo a fini di studio e divulgazione dell'oggetto (si pensi alla problematica della virtualizzazione della fruizione di beni museali) ma anche per scopi diversi quali la duplicazione e riproduzione di copie dell'oggetto (a scala identica al vero o a scala diversa). Di frequente, infatti, ci si trova di fronte a problematiche legate alla salvaguardia e conservazione dell'oggetto, in termini di accesso e visione da parte del pubblico, di mantenimento in particolari condizioni microclimatiche, di difficoltà di manipolazione a fini di studio e misura, ecc. Per soddisfare nel miglior modo possibile i requisiti di correttezza metrica e radiometrica che un rilievo ad elevata precisione richiede, è possibile utilizzare tecniche rappresentate dalla fotogrammetria digitale con ottiche Macro e dal laser a scansione, in particolare del tipo a triangolazione. Il sito archeologico risulta quasi sempre caratterizzato dal fatto di essere costituito da ruderi, porzioni o resti ridotti. Questo implica il fatto che ci si trova di fronte alla perdita dell'integrità, sia in ambito urbanistico, sia in scala architettonica, e quindi all'impossibilità di ottenere una visione sia del sito che del singolo elemento nella sua globalità.

Risulta particolarmente importante in ambito archeologico poter effettuare un rilievo con tecnologie ad alta risoluzione: la possibilità infatti di ottenere un modello tridimensionale del singolo oggetto di studio ma anche di porzioni del sito archeologico permette un'analisi delle relazioni ancora esistenti dei resti da indagare. Le forme movimentate ed articolate, caratterizzate spesso da profili di crollo, dalla presenza di elementi curvi, concavi e convessi, parti aggettanti e ruotate, la cui posizione è determinata spesso da innumerevoli alterazioni, oltre che dalla perdita delle rifiniture, hanno suggerito l'utilizzo del laser scanner, per superare le difficoltà del rilievo di tipo tradizionale con tutte le incertezze e le imprecisioni derivanti dalla conformazione morfologica. La visualizzazione tridimensionale risulta la più immediata e fedele alla realtà, e rende possibile una serie di ulteriori approfondimenti, come l'analisi delle dinamiche di crollo, la possibilità di monitorarne nel tempo le variazioni, la visualizzazione virtuale degli interventi di restauro.

Come accennato all'inizio la diffusione di tecniche geomatiche sempre più avanzate ed in grado di produrre in ambiente digitale rilievi di elevato dettaglio con grande efficienza ha portato l'utilizzo dei modelli digitali anche in ambito strutturale. La

modellazione tridimensionale in ambito strutturale, ad esempio, è utile per un'organizzazione ottimizzata per il calcolo agli elementi finiti della struttura di un edificio storico complesso partendo da una nuvola di punti, prodotto di un rilievo laser scanner ad esempio. La complessità degli edifici, o edifici che sono stati perturbati da terremoti potrebbero essere oggetto di creazioni tridimensionali dense per poter consentire senza pericolo o con meno mole di lavoro nelle fasi del processo, dal rilievo, all'elaborazione dei dati ed infine alla modellazione sismica. La creazione di nuvole di punti dense è essenziale per poter ricavare sezioni che permettano, grazie alla loro sovrapposizione, di ricreare un modello geometrico utilizzabile per le analisi di tipo strutturale.

Per quanto riguarda il settore ambientale, di notevole importanza risulta essere la parte relativa al monitoraggio. Esso è un tema molto attuale, basti pensare all'altissimo numero di casi di dissesto idrogeologico verificatisi in Italia negli ultimi anni e alle gravissime conseguenze cui portano. La modellazione tridimensionale densa potrebbe essere di qualche interesse per la stessa Protezione Civile, ente importantissimo per la coordinazione degli interventi da effettuarsi in caso del verificarsi di fenomeni naturali, come ad esempio nel caso di frane. Dai prodotti ottenuti, inoltre, si potrebbe dare, tramite l'estrazione di profili bidimensionali, una caratterizzazione del fenomeno per poter identificare un movimento, e una qualche relazione con la geologia esistente. Altro aspetto interessante è realizzare uno studio storico sul territorio o, disponendo di dati di periodi differenti, un confronto multi-temporale per il monitoraggio dell'area di interesse.

Infine, la modellazione tridimensionale oltre a far parte del settore "ingegneristico" ha acquisito un ruolo fondamentale anche in altri settori, come ad esempio il campo medico. Infatti grazie ad essa e successivamente alle stampanti 3D, è stato possibile realizzare con una minima spesa modelli tridimensionali per ottenere maggiori informazioni sui singoli casi, creare protesi e poter quindi ridurre i tempi operatori, migliorare la comunicazione fra medico e paziente e migliorare l'esito del paziente stesso. Due fattori critici per l'esito positivo delle procedure ortopediche e maxillo-facciali sono una chiara comunicazione tra medici e pazienti, nonché una precisa premodellazione dell'impianto. Una comunicazione chiara consente ai pazienti di prendere

decisioni informate riguardo al trattamento, mentre un adattamento preciso dell'impianto è fondamentale per il benessere del paziente. I modelli fisici tridimensionali pertanto rappresentano uno strumento di importanza inestimabile per migliorare l'esperienza del medico e del paziente.

In conclusione la modellazione tridimensionale risulta particolarmente utile ed efficiente per qualsiasi tipo di studio, dal campo architettonico a quello medico, grazie ai continui miglioramenti e innovazioni delle tecniche di rilievo e dei software.

2. L'EVOLUZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è la disciplina utilizzata per determinare la forma e la posizione degli oggetti a partire da fotografie. È una tecnica che avviene attraverso l'uso di immagini, quindi senza contatto con l'oggetto stesso, ed è quindi di grande efficacia in quanto è né invasiva né distruttiva.

Tramite questa scienza è possibile determinare le coordinate di punti oggetto in un sistema di coordinate tridimensionale, carte topografiche rappresentanti particolari planimetrici e curve di livello ed infine fotografie rettificate (ortofotopiani), mappe ad esse derivate (ortofotocarte) e immagini digitali

La fotogrammetria ha avuto un'enorme evoluzione, soprattutto negli ultimi anni con l'avvento della fotogrammetria digitale. Il tutto ebbe inizio con l'invenzione della fotografia avvenuta nel 1839. Negli anni successivi ci fu l'introduzione della stereo fotogrammetria, che consentiva il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello, di ortofoto e, grazie allo sviluppo del calcolo elettronico, negli anni '50 si sviluppò la fotogrammetria analitica. Negli anni '80 è nata la possibilità di utilizzare immagini non più fotografiche ma numeriche, conosciute come immagini digitali che possono essere elaborate con calcolatori specializzati che utilizzano algoritmi sempre più raffinati (Kraus; 1994).

Il problema fotogrammetrico è un problema di trasformazione di coordinate dello spazio oggetto rilevato e dell'immagine fotografica. Bisogna quindi determinare una relazione tra le coordinate oggetto tridimensionali (X, Y, Z) dei punti dello spazio reale, e le coordinate immagini bidimensionali (x, y) proprie dell'immagine fotografica (Figura 4).

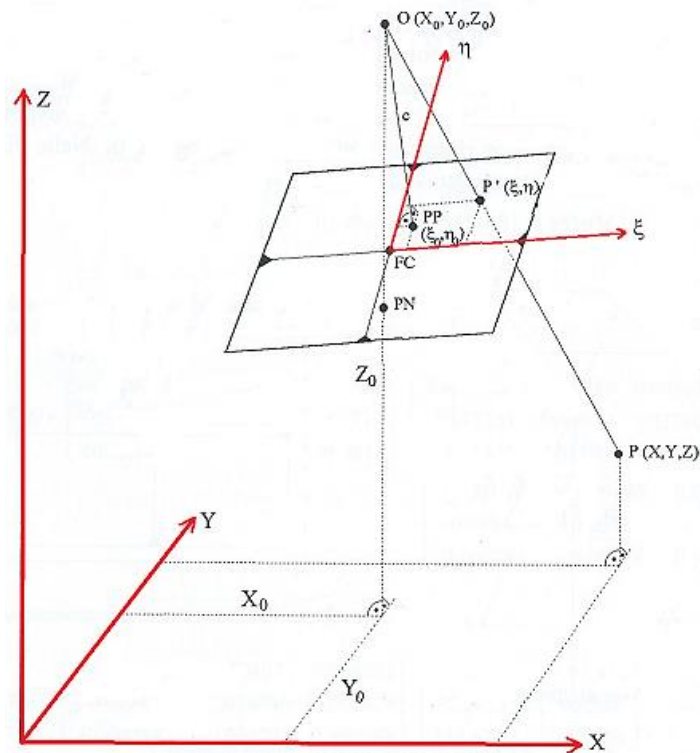


Figura 4: Relazione fra le coordinate di punti immagine e punti oggetto (modificata da Kraus, 1994).

Questo problema può essere suddiviso in tre fasi:

- Presa: dalle coordinate oggetto, noti i parametri di orientamento interno, vengono definite le coordinate immagine;
- Orientamento: note le coordinate oggetto e immagine, si determinano i parametri di orientamento esterno;
- Restituzione: dalle coordinate immagine, noti i parametri di orientamento, vengono determinate le coordinate spaziali dell'oggetto.

2.1 FONDAMENTI ANALITICI

La relazione che lega le coordinate dello spazio oggetto (X,Y,Z) con quelle dello spazio immagine (x,y) si chiama *proiettività*. La relazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto è definita dalle *equazioni di collinearità*. Tali relazioni si ottengono dalla formulazione di una trasformazione conforme (o di Helmert):

$$\bar{X} - \bar{X}_0 = \lambda R(\bar{x} - \bar{x}_0) \quad (1)$$

Dove

\bar{X} vettore delle coordinate oggetto;

\bar{X}_0 vettore delle coordinate oggetto del centro di proiettività;

R matrice di rotazione spaziale (funzione delle rotazioni elementari ω , φ , e κ , rispettivamente chiamati rollio, beccheggio e deriva, attorno ai tre assi coordinati);

λ fattore di scala;

\bar{x} vettore delle coordinate immagine;

\bar{x}_0 vettore delle coordinate immagine del centro di proiettività.

Nella formulazione si ipotizza un sistema di riferimento cartesiano ortogonale (X,Y,Z) e che solidale alle immagini sia stato definito un sistema cartesiano bidimensionale (x,y) . La trasformazione conforme è a 7 parametri (le rotazioni sono incluse nella matrice di rotazione R).

Parametri della trasformazione sono:
$$\begin{cases} X_0, Y_0, Z_0 \\ \varphi, \omega, \kappa \\ \lambda \end{cases}$$

La matrice di rotazione R è ottenuta dalla combinazione delle tre rotazioni elementari attorno agli assi cartesiani, considerando positive le rotazioni antiorarie (Figura 5), cioè $R_{\omega\varphi\kappa} = R_{\omega}R_{\varphi}R_{\kappa}$.

In forma matriciale si avrà:

$$\begin{matrix} R_\varphi & R_\omega & R_K \end{matrix}
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$
(2)

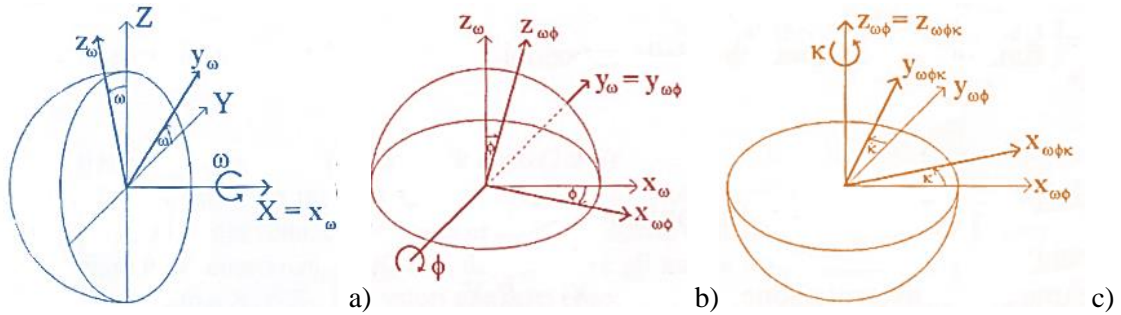


Figura 5: Sequenza delle tre rotazioni di un sistema di coordinate: primaria a), secondaria b), terziaria c) (modificata da Kraus, 1994).

In conseguenza delle condizioni di ortogonalità, la matrice R , è una matrice ortogonale che gode della proprietà $R^{-1} = R^T$.

La trasformazione può essere scritta in forma compatta come:

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix}$$
(3)

La soluzione analitica della forma compatta è:

$$\begin{aligned}
 X - X_0 &= \lambda[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c] \\
 Y - Y_0 &= \lambda[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c] \\
 Z - Z_0 &= \lambda[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]
 \end{aligned}$$
(4)

Il fattore di scala non è uniforme nei fotogrammi ed è quindi necessario esprimere la relazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto priva di tale fattore.

Dividendo la prima equazione per la terza e la seconda per la terza si ottengono le equazioni di collinearità:

$$\begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]} \end{aligned} \quad (5)$$

Le relazioni inverse si ottengono in base alla proprietà $R^{-1} = R^T$ della matrice di rotazione.

$$\begin{aligned} R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) &= \lambda R^{-1}R(\bar{x} - \bar{x}_0) \rightarrow R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) = \lambda(\bar{x} - \bar{x}_0) \rightarrow \\ \rightarrow (\bar{x} - \bar{x}_0) &= \frac{1}{\lambda} R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) \end{aligned} \quad (6)$$

Dividendo allo stesso modo la prima per la terza e la seconda per la terza si ottengono le corrispondenti relazioni inverse:

$$\begin{aligned} (x - x_0) &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) - r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ (y - y_0) &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) - r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (7)$$

Queste espressioni mostrano che ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine.

Dalla forma precedente invece si vede che ad un punto immagine corrispondono infiniti punti oggetto, comparendo al secondo membro il valore Z (da un solo fotogramma, in assenza di assunzioni, è impossibile ricostruire la geometria spaziale di un oggetto). È necessario un secondo fotogramma dello stesso oggetto oppure avere informazioni su Z .

Per definire la trasformazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto, sono richiesti 9 parametri che si distinguono in:

- 3 Parametri di Orientamento Interno (O.I.) x_0, y_0, c ;
- 6 Parametri dell'Orientamento Esterno (O.E.) $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, k$.

La conoscenza di tali parametri è fondamentale per la ricostruzione metrica dell'oggetto rappresentato nei fotogrammi. La posizione e l'assetto dei fotogrammi al momento dello scatto viene ricostruita applicando le procedure di orientamento basate sull'individuazione, sui fotogrammi, delle immagini di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (punti a coordinate oggetto note). Il problema è analogo a quello noto come intersezione indietro topografica. La Restituzione fotogrammetrica, obiettivo primario del rilievo, consiste nella ricostruzione geometrica dell'oggetto noti i parametri della trasformazione, mediante la misura delle corrispondenti coordinate immagine. Il problema della Restituzione fotogrammetrica è analogo a quello topografico noto come intersezione in avanti.

2.1.1. ORIENTAMENTO INTERNO DI UNA CAMERA METRICA

Il modello teorico proiettivo costituito dalle Equazioni di Collinearità, definisce rettilinea la corrispondenza tra i punti oggetto e i punti immagine. Le rette proiettive, nel modello, si intersecano in un punto, noto come il centro di proiezione “O” (Figura 6).

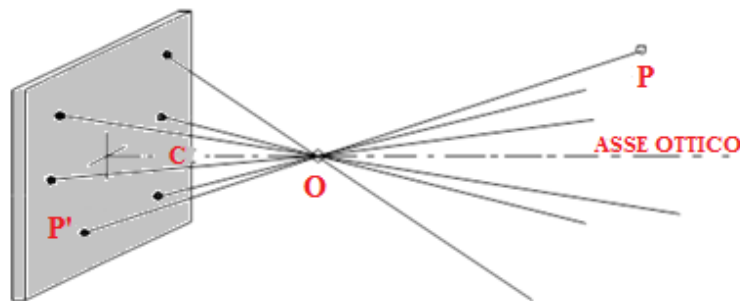


Figura 6: Centro di proiezione.

Finora si è assimilato il fotogramma ad una rigorosa prospettiva centrale, in cui il centro di prospettiva è a una distanza c dal punto principale del fotogramma.

I parametri quali la distanza principale c e le coordinate immagine del punto principale PP (ξ_0, η_0), sono detti parametri di orientamento interno e definiscono la posizione del centro di proiezione relativamente al piano dell'immagine.

Tuttavia questo è modello ideale e non corrisponde fedelmente alla realtà. Se si vuole ottenere la massima precisione possibile, è necessario tenere conto degli errori dell'obiettivo, della camera e del fotogramma stesso.

La teoria geometrica dei sistemi ottici postula l'esistenza, per ogni sistema ottico, di due piani principali H e H' (piani principali nello spazio-oggetto e nello spazio-immagine), su cui l'uno riproduce l'altro alla scala 1:1 perpendicolarmente all'asse ottico. Per un sistema ottico del tipo aria-vetro-aria (Figura 7), i due punti ottici principali, cioè le intersezioni dei piani principali con l'asse ottico OA, coincidono con i due punti nodali N e N'. Questi sono tali che, per definizione, i cosiddetti raggi centrali (passanti per i punti nodali) formano con l'asse ottico lo stesso angolo τ sia nello spazio oggetto che nello spazio immagine ($\tau' = \tau$).

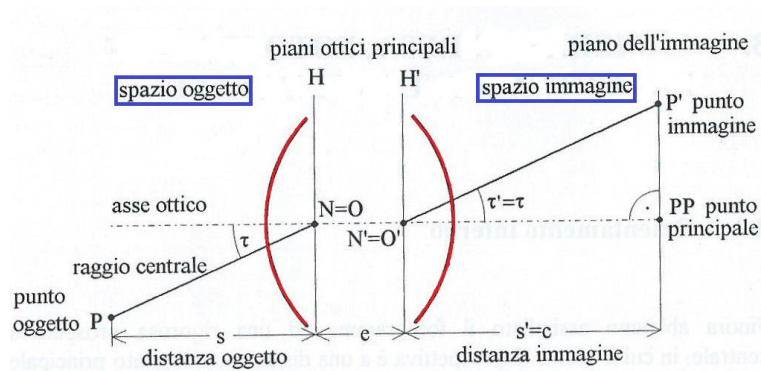


Figura 7: Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale. I punti nodali N, N' coincidono con i centri di prospettiva O, O' (modificata da Kraus, 1994).

In questo caso ideale, N è il centro di prospettiva O nello spazio-oggetto, N' è il corrispondente centro di prospettiva O' nello spazio immagine e la distanza principale c coincide con la distanza immagine s'. La distanza immagine s' e la distanza oggetto s sono sempre misurate a partire dai piani principali. Tuttavia, nella fotografia amatoriale pratica, la distanza da impostare sul dispositivo di focamento della camera è $D=(s+e+s')$, ossia è la distanza dell'oggetto dal piano immagine.

L'ottica delle camere fotogrammetriche è costituita da obiettivi di notevole spessore, di solito asimmetrici. Le singole lenti sono ricavate da tipi differenti di vetro ottico, in modo da assicurare la migliore correzione possibile alle aberrazioni. Di solito, il diaframma non è al centro dell'obiettivo. Ci si chiede pertanto dove sia situato il centro

di prospettiva. Tutti i raggi provenienti da un punto oggetto, che attraversano l'obiettivo, devono passare attraverso il diaframma. L'immagine apparente del diaframma vista dalla parte dell'oggetto limita perciò l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine; questa immagine apparente si chiama pupilla di entrata (EP). Il suo centro di prospettiva O nello spazio oggetto. L'analogua pupilla di uscita (EP') giace nello spazio immagine dell'obiettivo.

L'obiettivo fotogrammetrico reale differisce notevolmente dal modello ideale.

L'asse ottico dovrebbe contenere i centri di tutte le superfici sferiche delle lenti. Dopo l'incollaggio e l'assemblaggio di tutte le singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla camera rispetto al telaio meccanico che individua il piano di focamento, si saranno inevitabilmente accumulati piccoli errori. Pertanto l'asse di riferimento fotogrammetrico non sarà l'asse ottico OA, ma un raggio principale PR_A calibrato (cioè standardizzato) che, nello spazio oggetto, è perpendicolare al piano immagine e passa per il centro della pupilla di ingresso. Il suo prolungamento interseca il piano immagine nel cosiddetto punto principale di auto collimazione (PPA). In Figura 8 mostra il PR_A cioè il raggio principale (autocollimazione); il PPA cioè il punto principale di autocollimazione nel piano immagine IP; il EP e EP' cioè rispettivamente la pupilla di entrata e quella di uscita; O'P cioè il centro di prospettiva fisico; c cioè la distanza principale; ρ cioè la distanza radiale dell'immagine che equivale a $\rho = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$ ed infine $\Delta\rho$ cioè la distorsione ottica radiale.

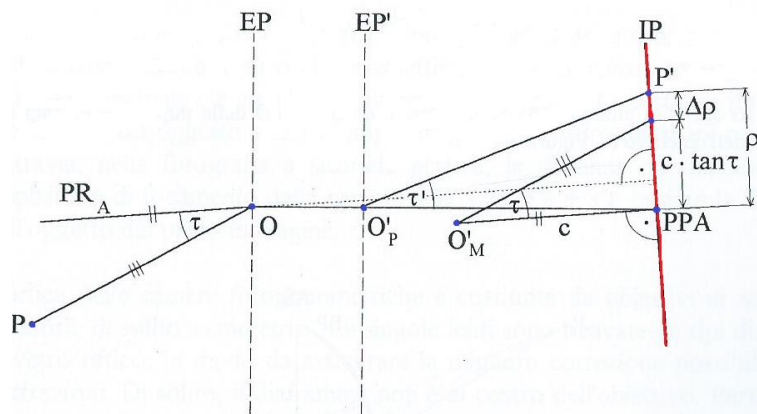


Figura 8: Definizione del centro di prospettiva O'_M (modificata da Kraus, 1994).

Gli angoli τ sono definiti nel centro della pupilla di ingresso e non nei punti nodali. Poiché la pupilla di ingresso di solito non giace sul piano principale H, ne segue che τ' non è uguale a τ . La distanza principale s'_m realizzata meccanicamente, definita dal telaio del piano focale della camera, differisce leggermente dalla distanza principale ottica s' . Il piano immagine non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico. In sintesi, la conseguenza di questi piccoli errori è che gli angoli τ' nello spazio immagine non sono uguali ai angoli τ nello spazio oggetto. Si definisce perciò un centro di prospettiva matematico O'_M collocato ad una distanza perpendicolare c (distanza principale) dal punto principale di auto-collimazione PPA e che riproduce gli angoli τ il più fedelmente possibile.

Gli errori residui vengono attribuiti alla distorsione ottica $\Delta\rho$.

Pertanto ai parametri di orientamento interno, finora definiti (ξ_o, η_o, c) , si deve aggiungere la distorsione ottica radiale $\Delta\rho$. L'equazione dell'orientamento interno è:

$$\rho = c \tan \tau + \Delta\rho \quad (8)$$

Le camere fotogrammetriche vengono calibrate in laboratorio (calibrazione di laboratorio) con l'aiuto di un goniometro ottico (Figura 9).

Inizialmente, prima di montare la camera sullo strumento, il cannocchiale di osservazione T1 è posto nella posizione zero, definita per auto collimazione con il cannocchiale T2. Poi si monta la camera, con il suo centro di prospettiva O nello spazio oggetto posto sull'asse di rotazione, e la si ruota attorno a EP finché l'immagine riflessa del reticolo del cannocchiale T2 si sovrappone al reticolo di T1 (auto collimazione). A questo scopo si pone, sul piano immagine (telaio del piano focale) della camera, una lastra di vetro piana, dotata di una piccola superficie riflettente. Sulla faccia rivolta verso lo spazio oggetto questa lastra porta, inoltre un reticolo graduato di precisione.

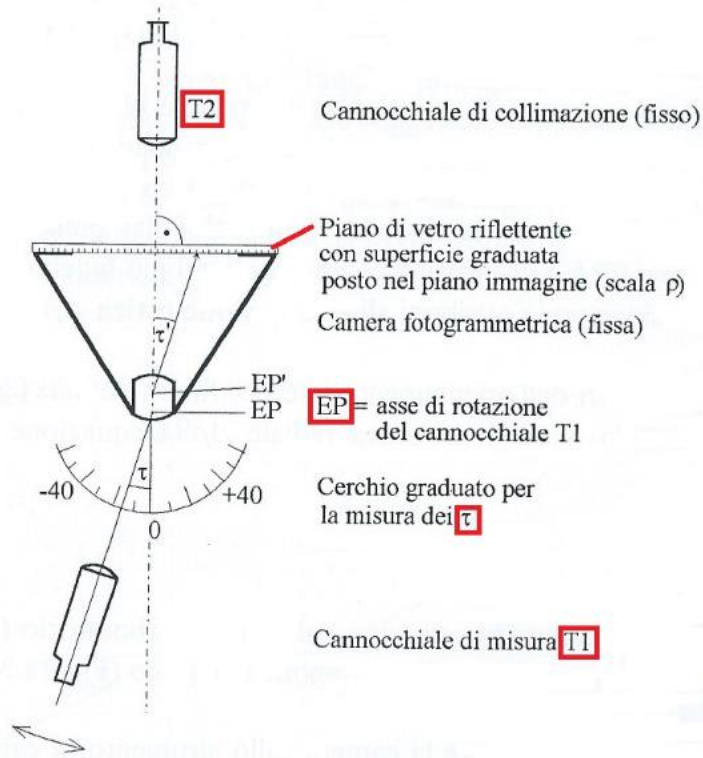


Figura 9: Schema semplificato di foto-goniometro (modificata da Kraus, 1994).

Nella posizione zero del cannocchiale T1, come definita in precedenza, l'operatore osserva ora il punto principale di auto collimazione PPA, che viene assunto come origine della scala ρ . Poi l'operatore collima con T1 le diverse graduazioni della scala ρ lungo ciascuna semi-diagonale del formato quadrato dell'immagine e misura i relativi angoli τ . Si possono così calcolare le distorsioni ottiche radiali come differenze $\Delta\rho = \rho - c_0 \tan \tau$, dove c_0 è il valore più plausibile della distanza principale.

Di solito i risultati sono asimmetrici: le curve non coincidono. Questa asimmetria è causata da errori di centramento delle singole lenti, dal fatto che il piano immagine non è perfettamente perpendicolare all'asse ottico e dagli errori delle lenti stesse e, infine, dalla limitata precisione con cui si è potuta determinare la posizione del PPA. Questa asimmetria si può ridurre fortemente, scegliendo un altro asse di riferimento PRS, leggermente diverso dal raggio principale di auto collimazione PR_A . Questo asse PR_S è detto raggio principale di simmetria: passa anch'esso per O, cioè attraverso il centro della pupilla di entrata EP, e interseca il piano immagine nel punto principale di simmetria PBS (*Point of Best Symmetry*).

L'aver cambiato l'asse di riferimento, da PR_A a PR_S , ha i seguenti effetti pratici:

- ξ_0 e η_0 sono ora le coordinate immagine riferite al PBS;
- il nuovo centro matematico di prospettiva è a distanza c da PBS;
- le distorsioni devono essere ricalcolate e riferite a PBS;
- le rotazioni contenute negli elementi r delle equazioni della prospettiva centrale sono riferite al nuovo asse PR_S .

I fotogrammi ottenuti con vecchi obiettivi fotogrammetrici hanno una distorsione radiale media fino a $30 \mu\text{m}$. Gli obiettivi moderni sono praticamente privi di distorsione ($\Delta\rho \leq 5 \mu\text{m}$).

La distorsione dei moderni obiettivi viene corretta solo nella fotogrammetria analitica di precisione; in tal caso si tiene conto anche della distorsione tangenziale e delle deformazioni dei fotogrammi.

Per definire materialmente il sistema di coordinate immagine e il relativo centro di presa, si utilizzano le marche fiduciali; l'intersezione delle rette passanti per le coppie di marche fiduciali opposte definisce il centro fiduciale FC. La maggior parte delle camere fotogrammetriche sono realizzate in modo che il PPA e il PBS cadano all'interno di un cerchio con centro in FC e raggio $\leq 20 \mu\text{m}$.

Il certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica contiene le seguenti informazioni sull'orientamento interno:

- le coordinate immagine delle marche fiduciali ed, eventualmente, le distanze tra le marche (misurate lungo i lati e le diagonali);
- nello stesso sistema, le coordinate di PBA, PBS, FC;
- la distanza principale c ;
- la curva di distorsione media radiale;
- la data della calibrazione;
- informazioni sulla risoluzione dell'immagine.

Le camere fotogrammetriche dovrebbero essere ricalibrate ad intervalli regolari. Una camera aerea è molto pesante e pertanto può subire lievi danni per urti durante il trasporto o il montaggio sull'aereo. Inoltre essa è sottoposta a forti sbalzi di temperatura.

Se il film viene spianato con un dispositivo a depressione contro una piastra metallica nel magazzino del film e la piastra è premuta a sua volta contro il telaio del piano focale, il magazzino deve essere incluso anch'esso nell'operazione di calibrazione.

In fotogrammetria analitica l'orientamento interno viene ricostruito trasformando le coordinate immagine misurate delle marche fiduciali nei valori calibrati riportati sul certificato di calibrazione. Si eliminano così lo stiramento e la deformazione isotropa. Inoltre, si tiene conto della distorsione radiale media dell'obiettivo della camera.

Nella fotogrammetria analogica in pratica, si impone sullo strumento solitamente la distanza principale di calibrazione.

2.1.2. ORIENTAMENTO ESTERNO E RESTITUZIONE

Fondamentalmente, la restituzione richiede che sia ricostruita la geometria di presa dei fotogrammi, per mezzo di una proiezione “analogica” o “analitica”.

Se i parametri di orientamento esterno sono noti il problema è molto semplice.

Diversamente, se i parametri di orientamento esterno sono incogniti, devono essere determinati tramite l'ausilio di punti di appoggio.

Esistono diversi metodi di risoluzione dell'orientamento esterno, classificabili in tre gruppi: orientamento indipendente di due fotogrammi, orientamento contemporaneo di due fotogrammi ed infine orientamento simultaneo di due fotogrammi in due fasi successive.

- **ORIENTAMENTO INDIPENDENTE DI DUE FOTOGRAMMI**

È necessario disporre di almeno tre punti di appoggio visibili su entrambi i fotogrammi per poter risolvere il sistema nelle 6 incognite (φ , ω , K , X_0 , Y_0 , Z_0).

Con 3 PFA si possono infatti scrivere 6 equazioni di collinearità.

Il metodo prevede la linearizzazione delle equazioni di collinearità e l'introduzione di valori approssimati alle incognite. Tale metodo è anche chiamato "vertice di piramide".

- **ORIENTAMENTO CONTEMPORANEO DI DUE FOTOGRAMMI**

Si misurano le coordinate immagine dei punti di appoggio e di alcuni altri punti.

Ogni i -esimo punto di appoggio fornisce, su un singolo fotogramma, 4 equazioni nelle 12 incognite.

Per ciascun altro punto si hanno 3 incognite aggiuntive (le coordinate oggetto) ma 4 nuove equazioni. La soluzione si ottiene compensando le osservazioni attraverso il metodo delle Osservazioni Indirette. Questa è la procedura più precisa in quanto può utilizzare un numero elevato di punti omologhi che hanno come effetto quello di irrobustire il sistema ed impiega direttamente le equazioni di collinearità.

- **ORIENTAMENTO SIMULTANEO DI DUE FOTOGRAMMI IN DUE FASI SUCCESSIVE**

Nella prima fase si crea un modello stereoscopico a partire da due fotogrammi (procedura di Orientamento Relativo), nella seconda si trasforma questo modello nel sistema di riferimento solidale all'oggetto X , Y , Z (procedura di Orientamento Assoluto).

La seconda fase viene realizzata applicando una trasformazione conforme spaziale che sulla base di punti d'appoggio permette di ricavare i sette parametri incogniti: 3 rotazioni, 3 traslazioni e 1 fattore di scala.

La prima fase conduce alla creazione del modello stereoscopico. Il modello è completamente formato nel sistema x , y , z (sistema modello) quando si intersecano i raggi omologhi di almeno 5 punti ben distribuiti sul modello. Le incognite stimate nella

seconda fase della procedura sono i sette parametri che definiscono una trasformazione conforme nello spazio. I parametri di Orientamento Esterno relativi ad una coppia di fotogrammi sono $6 + 6 = 12$. È per questo che rimangono 5 incognite da risolversi nella fase di Orientamento Relativo.

2.1.3 TRIANGOLAZIONE FOTOGRAMMETRICA

Consiste nell'orientamento esterno di un blocco di fotogrammi, tramite l'ausilio di punti omologhi o di legame. Questi sono punti di cui non sono note le coordinate oggetto ma è possibile misurarne le coordinate immagine su almeno una coppia di fotogrammi.

Questo consente di ridurre al minimo i punti di appoggio da utilizzare.

Generalmente esistono due metodi per la TA:

- a modelli indipendenti;
- a stelle proiettive.

Per quanto riguarda la prima tipologia, avendo a disposizione n fotogrammi per blocco, vengono costruiti gli $n-1$ modelli tramite orientamento relativo.

Successivamente su ogni modello si identificano i punti di interesse di cui si estraggono le coordinate tridimensionali nei singoli sistemi modello.

I singoli modelli stereoscopici nel corso del calcolo vengono connessi in un unico blocco che verrà trasformato poi nel sistema di riferimento a terra.

Per il metodo a stelle proiettive i fotogrammi possono essere acquisiti secondo due modalità (Figura 10): con assi della camera convergenti o con assi paralleli tra loro.

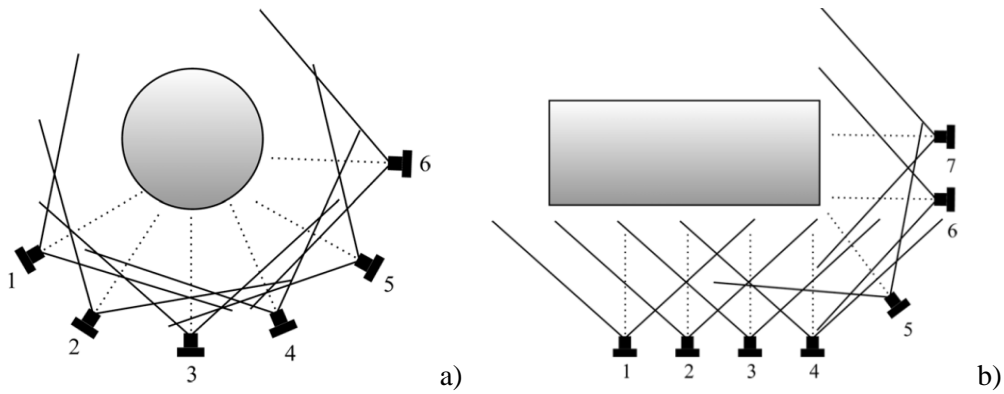


Figura 10: Assi della camera convergenti (a), paralleli (b) (modificata da Zanutta; 2015).

Questo metodo prevede la stima simultanea dell'orientamento esterno di tutte le stelle del blocco, intese come insieme delle rette proiettive.

È quindi un'estensione della procedura di orientamento esterno contemporaneo e simultaneo di una coppia di fotogrammi, ad un blocco di fotogrammi. Per il calcolo vengono sempre impiegati i punti omologhi di cui si misurano le coordinate immagine e di punti di appoggio di cui sono note le coordinate oggetto e si misurano quelle immagine.

2.2 FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

La principale differenza tra la fotogrammetria analitica e la fotogrammetria digitale risiede nella diversa natura del dato primario, cioè le immagini, in quanto nella fotogrammetria analitica sono fotografie mentre in quella digitale le immagini sono digitali.

Oltre a questa differenza, se ne possono individuare altre di tipo operativo, cioè nella fotogrammetria analitica, è l'operatore che sceglie i punti necessari alle operazioni di orientamento e di restituzione e, collimandoli, ne misura le coordinate; mentre in quella digitale, i punti da collimare, nelle fasi di orientamento e restituzione, possono essere scelti da un operatore ma lo stesso operatore può scegliere se avvalersi di procedure automatiche.

2.2.1 CARATTERISTICHE DELLE IMMAGINI DIGITALI

Un'immagine digitale può essere considerata come una funzione continua $g(x,y)$ dove x, y sono variabili spaziali. La variabile dipendente esprime il contenuto radiometrico.

L'immagine digitale è dunque una funzione discreta ottenuta campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori di grigio corrispondenti e consiste in una matrice $g(x,y)$ i cui elementi sono detti pixel.

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dove

$x=0,1,\dots,C-1$ indice di riga

$y=0,1,\dots,R-1$ indice di colonna

R =massimo numero di righe

C=massimo numero di colonne

$g(x,y) = \{0,1,\dots,\max\}$ valori di grigio

Ovvero l'immagine digitale è costituita da elementi discreti, ad ognuno dei quali è associato un numero intero positivo detto Numero Digitale.

L'immagine è suddivisa in elementi areali di dimensioni finite e ad ognuno di essi è associata la radiometria della porzione di immagine contenuta (Figura 11). Ogni pixel può essere visto come elemento di una matrice, e quindi individuato univocamente da due numeri interi, che rappresentano la posizione del pixel all'interno della matrice: l'indice di riga e di colonna. Il pixel è quindi la parte elementare e inscindibile dell'immagine ed ha una posizione fissata a priori che non può variare nel tempo (contenuto metrico dell'immagine).

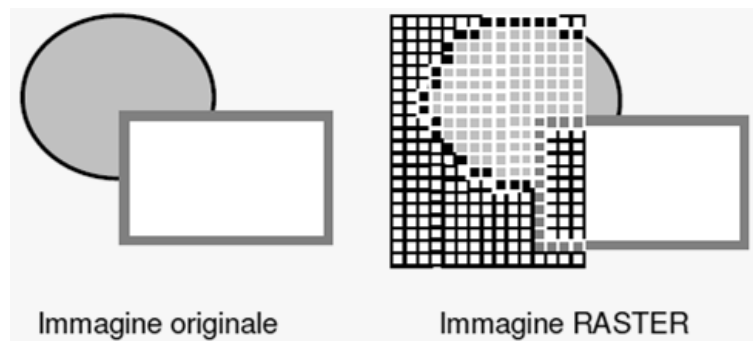


Figura 11: Formazione dell'immagine digitale (modificata da Zanutta; 2015).

Il processo di formazione di un'immagine digitale consiste quindi in due operazioni, la quantizzazione e il campionamento, che sono direttamente legate alle due caratteristiche fondamentali di questo tipo di immagini: la risoluzione radiometrica e la risoluzione geometrica.

- **RISOLUZIONE RADIOMETRICA DI UN'IMMAGINE DIGITALE**

La risoluzione radiometrica è legata alla quantizzazione, cioè alla conversione dell'intensità del segnale luminoso (trasformata dal sensore in un valore reale di intensità elettrica) in un numero intero, che viene memorizzato in corrispondenza di ciascun *pixel*. Essa viene stabilita in funzione delle esigenze geometriche o tematiche dell'utilizzatore e della tipologia del dato spettrale (pancromatico, colore o multispettrale).

In Tabella 1 si illustrano i valori standard che si adottano.

n° bit	n° byte	DN	Tipo di immagine digitale
1	(1/8)	2	Bianco e Nero (B/N)
8	1	256	Toni di grigio o palette di colori
16	2	65536	64K colori
24	3	16777216	Red Green Blue (RGB)

**Tabella 1: Vari tipi di immagini digitali in relazione al proprio contenuto radiometrico (DN)
(modificata da Zanutta; 2015).**

Se l'immagine digitale, per esempio, deve rappresentare un oggetto a soli due colori, la radiometria può essere espressa da due numeri interi: 0 per il bianco, 1 per il nero;

Se l'immagine deve rappresentare un oggetto in toni di grigio (foto in b/n per esempio) la radiometria può essere espressa con un numero intero compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco). Valori intermedi indicano le diverse gradazioni di grigio (grey value).

Se l'immagine digitale deve rappresentare un oggetto a colori, immagini True Color (RGB, rosso-verde-blu), ogni colore è la sovrapposizione di tre colori fondamentali. La saturazione di ognuno dei tre colori viene rappresentata da un valore compreso tra 0 e 255. Quindi la radiometria di un pixel è rappresentata dai tre numeri che esprimono le saturazioni dei tre colori fondamentali.

Una immagine è descritta da tre matrici; si parla perciò di matrice immagine a tre piani. Le immagini a colori a tre canali, possono essere espresse: $G_c = \{g_1(i, j), g_2(i, j), g_3(i, j)\}$ nella quale le tre funzioni $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$, $g_3(x, y)$ possono indicare ad esempio i tre livelli Rosso, Verde, Blu (immagini RGB o *true color*) o Giallo, Ciano e Magenta (immagini YCM).

- **RISOLUZIONE GEOMETRICA DI UN'IMMAGINE DIGITALE**

La risoluzione geometrica è legata all'operazione di campionamento, cioè fondamentalmente all'area di immagine corrispondente a ciascun elemento del sensore; poiché un'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale i cui elementi o *pixel* sono i contenitori dell'informazione, un'elevata risoluzione geometrica comporta la generazione di una matrice con un grande numero di righe e colonne, cioè un elevato numero di *pixel* molto piccoli. Il parametro che indica il numero di pixel contenuti in

un'unità di lunghezza e quindi la dimensione degli stessi, è la risoluzione geometrica, che solitamente è indicata in DPI, cioè *Dots Per Inch* (punti per pollice).

1 pollice = 25.4mm.

$$dpi = \frac{n^{\circ} \text{ pixel}}{\text{pollici}} \quad (10)$$

In alternativa, la risoluzione, può essere espressa come dpix ossia dimensione del pixel in μm . Le espressioni danno la relazione tra dpi e dimensione dpix del pixel:

$$dpi : 25400 = 1 : dpix$$

Dove 25400 è il valore di un pollice in un μm e 1 è il pixel.

Ovvero

$$dpi * dpix = 25400 * 1$$

$$d_{pix} = \frac{25400}{d_{pi}} \quad d_{pi} = \frac{25400}{d_{pix}} \quad (11)$$

Il modo più corretto per valutare la risoluzione dell'immagine digitale è quello di prendere in considerazione l'area di superficie reale la cui immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore, copre la superficie di un pixel; tale area viene detta *Ground Sampling Distance (GSD)*.

$$GSD = l * \frac{Z}{c} \quad (12)$$

Dove

Z è la distanza di presa,

c è la focale della camera,

l è la dimensione del lato del pixel,

$Z/c=m_b$ è il fattore di scala.

A parità di distanza dell'oggetto dall'obiettivo, la risoluzione di un'immagine è tanto maggiore quanto più piccola è la dimensione del lato del pixel del sensore: maggiore è il numero di pixel, più l'immagine riproduce in modo fedele la realtà.

In genere si usano *pixel* quadrati e quindi risoluzioni uguali nelle due direzioni del sistema di riferimento interno

Direttamente legata alla dimensione del *pixel* è la definizione del sistema di riferimento interno dell'immagine; infatti se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, bisogna definire la relazione fra la posizione del *pixel* e il sistema di coordinate immagine.

In Figura 12 è mostrato il sistema di coordinate immagine con l'origine spostata di mezzo *pixel* all'esterno della matrice immagine; le coordinate immagine del centro di un *pixel* g_{ij} si ottengono moltiplicando il numero di indice per la dimensione del *pixel*.

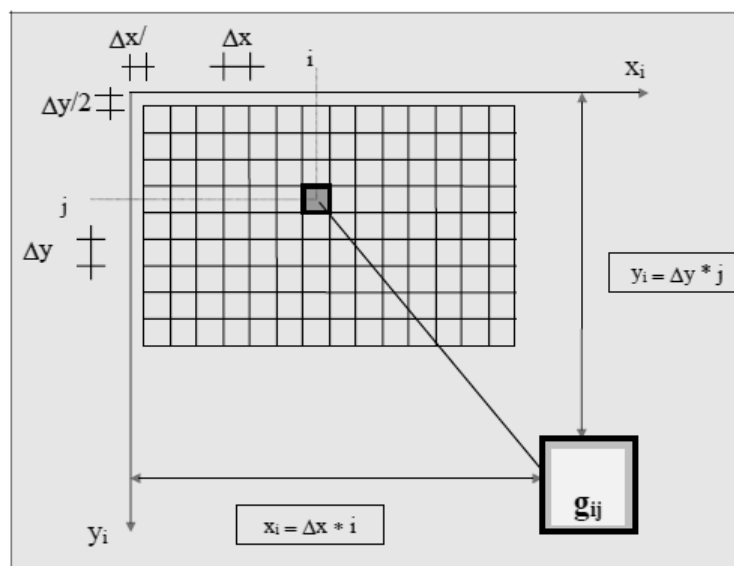


Figura 12: Contenuto metrico delle immagini digitali (modificata da Zanutta; 2015).

La tradizionale misura di coordinate è sostituita dall'individuazione del *pixel* all'interno della matrice immagine. Tale posizione si traduce in coordinate reali oggetto attraverso le relazioni analitiche della fotogrammetria.

Se i *pixel* sono convenientemente piccoli, si assumono gli indici riga e colonna come fossero le coordinate immagine e anche la distanza principale c può essere espressa in unità Δx e Δy .

2.2.2 TRATTAMENTO DELLE IMMAGINI DIGITALI

Esistono una serie di operazioni che possono essere eseguite sulle immagini digitali, dal momento della loro acquisizione, alla trasmissione e rappresentazione. Tali procedure di elaborazione possono essere raggruppate in cinque gruppi:

- Acquisizione;
- Compressione;
- Pretrattamento e ripristino;
- Segmentazione;
- Visualizzazione.

La prima fase è costituita dall'acquisizione che corrisponde alla modalità con la quale vengono generate le immagini digitali le quali possono ottenersi in maniera diretta tramite macchine digitali o indiretta attraverso scanner fotogrammetrici.

La seconda viene definita come compressione, in questa fase le immagini digitali quantizzate vengono definite nella dimensione del Byte, richiedendo l'utilizzo di schede di memoria per la memorizzazione, che consentirà di poterle elaborare su un computer.

Nella terza fase del trattamento delle immagini prevede il pretrattamento e ripristino. Le due procedure sono volte a migliorare l'aspetto delle immagini digitali (*enhancement*) o volte a recupero di immagini degradate (*restoration*). Il primo ha come obiettivo quello di ottenere un'immagine con caratteristiche migliori rispetto a quella originale. Mentre il secondo ha lo scopo di rimuovere o minimizzare il degrado introdotto nell'immagine nella fase di acquisizione.

La quarta fase è rappresentata dalla segmentazione, ovvero quelle operazioni che permettono di suddividere le immagini in aree significative.

La quinta ed ultima fase del trattamento delle immagini è costituita dalla visualizzazione, tecnica utilizzata per presentare le immagini.

Nella tecnica di pretrattamento, *l'image restoration* ha lo scopo di rimuovere o minimizzare il degrado introdotto nell'immagine nella fase di acquisizione. Tra le cause di disturbo si possono citare:

- Il movimento dell'oggetto;
- Lo sfocamento;
- La distorsione delle lenti;
- Il rumore radiometrico.

Esistono degli algoritmi di filtraggio, quali ad esempio il filtro *Gamma*, il filtro *k-nearest neighbour*, l'espansione della scala dei livelli radiometrici, la riduzione adattativa del rumore, che permettono di attuare le operazioni di image restoration.

Questa tecnica ha come obiettivo quello di ottenere un'immagine con caratteristiche migliori rispetto a quella originale.

Si possono usare tecniche, ad esempio, di manipolazione delle immagini che permettono di esaltare i bordi radiometrici, oppure variare la posizione dei valori di grigio, variare il contrasto oppure cercare di ridurre una dato rumore radiometrico sull'immagine. Queste tecniche possono essere suddivise in due grandi gruppi:

- Il miglioramento del contrasto (*contrast enhancement*): insieme di tecniche che permettono di migliorare il contrasto globale dell'immagine, basate sulla equalizzazione dell'istogramma dei valori radiometrici;
- Il miglioramento dei bordi radiometrici (*edge enhancement*): insieme di algoritmi che migliorano il gradiente radiometrico nella zona del bordo radiometrico. Essi operano rendendo più ripido il bordo radiometrico assottigliandone la dimensione geometrica (algoritmo EPS Edge preserving Smoothing) sia aumentando la differenza radiometrica agli estremi dei bordi (filtri di Wallis e HBF High Boost Filter).

Poiché queste tecniche spesso alterano drasticamente i dati numerici originari, esse vengono normalmente applicate solo a fini di fotointerpretazione, e non quando si prevede di sottoporre l'immagine ad ulteriori analisi numeriche.

Nello specifico, parlando di fotogrammetria, prima di eseguire la restituzione bisogna cercare di migliorare l'aspetto radiometrico dell'immagine. È necessario dunque sottolineare tre caratteristiche fondamentali delle immagini digitali: la luminosità, il contrasto e l'istogramma dei valori radiometrici.

Dato il modello dell'immagine in toni di grigio $g(x, y)$, il parametro che esprime la luminosità (o brillantezza) è dato dalla media $g_a(x, y)$.

$$g_a = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} g(x, y) \quad (13)$$

Per esprimere il contrasto è invece opportuno utilizzare la deviazione standard σ .

$$\sigma = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x, y) - g_a)^2 \quad (14)$$

I due parametri sopra descritti permettono di definire la funzione di trasferimento del contrasto che permette, tramite la variazione dei parametri, la regolazione cromatica dell'immagine.

$$g'_{ij} = \alpha g_{ij} + r \quad (15)$$

Dove:

g'_{ij} sono gli elementi della matrice modificata;

g_{ij} sono gli elementi della matrice non modificata;

α è il parametro di controllo del contrasto;

r è il parametro di controllo della brillantezza.

Se viene cambiato il parametro r il risultato di tale variazione sarà lo spostamento o in positivo o in negativo di tutti i valori di pixel dell'immagine, cioè si schiariscono o scuriscono in modo eguale tutti i colori. Per questo motivo viene introdotto un parametro che consente di effettuare tale modifica sull'immagine ma senza perdere informazioni per la saturazione dei toni chiari o scuri.

Tale funzione può non essere lineare:

$$g'_{ij} = g_{ij}^{\gamma} \quad (16)$$

Si definisce quindi il coefficiente γ che consente di aumentare il dettaglio in un'immagine a basso contrasto, senza influenzare significativamente le ombre zone di luce.

Altro parametro che viene preso in considerazione e che permette una valutazione immediata è l'istogramma dei livelli radiometrici (Figura 13, Figura 14). Esso consiste nella rappresentazione della distribuzione dei valori di grigio, ossia una rappresentazione sintetica dei dati contenuti in un'immagine. Considerando il DN di ciascun pixel di un'immagine come una variabile casuale, il corrispondente istogramma ne rappresenta un grafico discreto di frequenza che esprime la distribuzione dei livelli di grigio sull'immagine.

La conoscenza dell'istogramma dei valori di grigio è utile per procedere a espansioni o riduzioni di scala, noti che siano i valori di grigio minimo e massimo presenti.

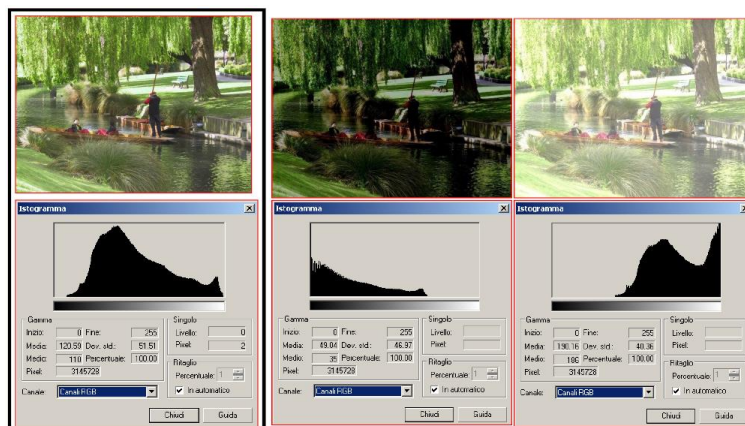


Figura 13: Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine Red Green Blue, diminuendo e aumentando la luminosità (Zanutta; 2015).

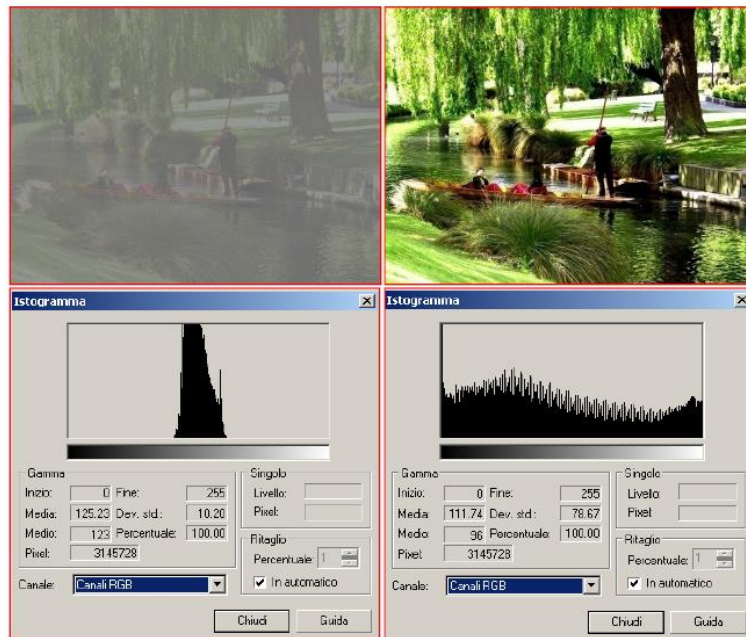


Figura 14: Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine Red Green Blue, diminuendo e aumentando il contrasto (Zanutta; 2015).

2.2.3 FORMATI DI MEMORIZZAZIONE DI IMMAGINI

I dati contenuti nelle immagini digitali devono essere memorizzati in modo tale da poter ricostruire fedelmente l'immagine.

Una prima distinzione va realizzata suddividendo i formati non compressi e compressi.

Il formato non compresso è il *formato Bitmap* (BNP). E' un file di immagine grafica che immagazzina i pixel sotto forma di tabella di punti e che gestisce i colori sia in True color, sia attraverso una paletta indicizzata, sia B/N.

La compressione delle immagini risulta necessaria per garantire la minima occupazione di memoria su disco e per aumentare la possibilità di visualizzazione.

Esistono due tipologie di compressione:

- Lossless (senza perdita): in tal caso dall'immagine compressa si riescono a ricavare tutte le informazioni contenute nell'immagine originale, utilizzata nel formato TIFF;
- Lossy (con perdita): questa volta l'immagine che è stata compressa presenta un'informazione simile a quella originale con perdita quindi di qualche informazione.

Tra i formati compressi si possono avere:

- *Formato TIFF* (Tagged Image File Format), consente di memorizzare in un unico file più di una immagine ed è un formato supportato da tutte le piattaforme grafiche.
- *Formato GIF*, contiene un numero limitato di colori N (tipicamente 3, 16, 256) e di conseguenza non si ha perdita di informazione solo se l'immagine originale ha meno di N colori. L'algoritmo secondo cui l'immagine viene compressa è LZW (lossless).
- *Formato PNG*, compressione lossless simile a GIF, ma rispetto a quest'ultimo è meno supportato.
- *Formato JPEG*, compressione lossy che si basa sulle peculiarità della visione umana (tiene conto della maggior sensibilità dell'occhio umano alle variazioni di luminosità piuttosto che di cromaticità; e della difficile percezione di elevate variazioni tra pixel ravvicinati). Questo formato è più adatto a immagini con colori sfumati. Il livello di qualità della compressione può essere inoltre variato.

2.2.4 ACQUISIZIONE DI IMMAGINI DIGITALI

Di fondamentale importanza risulta la fase di acquisizione delle immagini. In questa fase si può parlare di acquisizione diretta quando l'immagine viene presa tramite camere digitali.

Nelle camere digitali l'elemento che raccoglie l'immagine sul piano focale è un sensore. Esso svolge la funzione di cattura e memorizzazione dell'immagine che nelle vecchie macchine da presa veniva assolta dalla pellicola. Il chip elettronico, che oggi è parte essenziale della camera digitale, comprende anche il sensore.

Oggi esistono due tipi di sensori, mostrati in Figura 15, che vengono utilizzati dalle camere digitali: il CCD (*charged-coupled device*: dispositivo ad accoppiamento di carica) e il CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

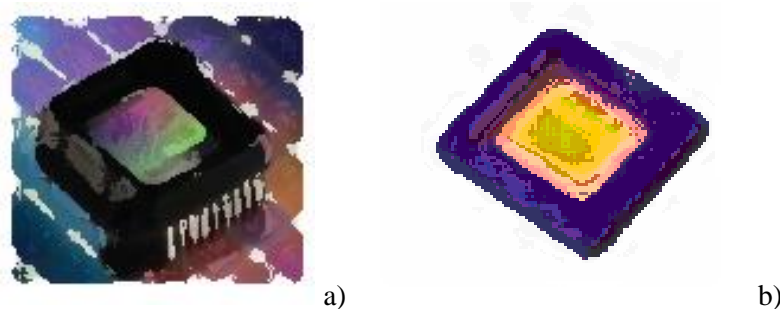


Figura 15: Immagine di un sensore CCD (a) e di un sensore CMOS (b) (modificata da Zanutta, 2015).

Entrambi i sensori sono costituiti da elementi disposti in linea o in una matrice in due dimensioni; l'energia della luce cade sugli elementi fotosensibili del grigliato dei pixel e viene convertita in una matrice di valori numerici. Ciò che differenzia sostanzialmente le due tipologie di sensori è la modalità di trasformazione della carica elettrica in tensione e il suo trasferimento dal chip alla camera (Figura 16).

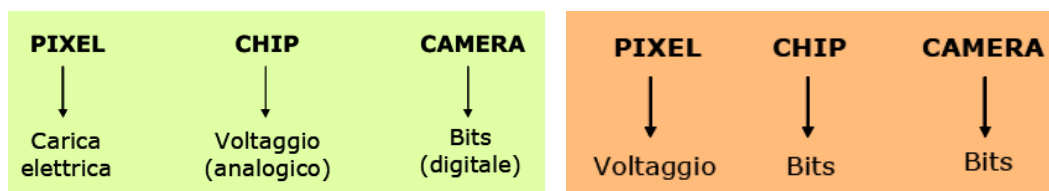


Figura 16: Conversione e trasferimento del segnale digitale nei sensore CCD (giallo) e CMOS (arancio) (modificata da Zanutta; 2015).

Il sensore CCD è formato da due parti fondamentali: la *matrice di pixel* e il *filtro di luce*. La matrice di pixel, è costituita da condensatori metallo-ossido-semiconduttore (MOS) disposti a scacchiera, uno accanto all'altro, che in determinate condizioni per mezzo dell'effetto fotoelettrico possono liberare elettroni sfruttando l'energia dei fotoni della luce incidente il condensatore. Il secondo è un filtro che permette su ogni singolo pixel solo il passaggio di determinate frequenze di luce (solitamente rosso, verde o blu), consentendo dopo una opportuna fase di rielaborazione dei dati una visione dell'immagine a colori.

Nel sensore CCD, i pixel che lo compongono trasferiscono l'informazione in modo sequenziale l'uno all'altro fino a che non si arriva ad una "riga di lettura" (shift register). È opportuno sottolineare che la trasformazione della carica elettrica in un segnale analogico di tensione avviene quindi solo quando si arriva a questa riga di lettura alla fine della quale troviamo un amplificatore che manda il segnale in uscita.

Per trasformare poi il segnale da analogico a digitale, occorre un convertitore A/D che generalmente è esterno al sensore.

Il sensore CMOS è costituito da quattro parti: il filtro colori, la matrice di pixel, il controllore digitale e il convertitore analogico digitale. La luce arriva attraverso le lenti dell'obiettivo e viene elaborata dal filtro colore prima di arrivare alla matrice. Una volta raggiunta, ogni pixel converte la luce in tensione amplificata che verrà poi inviata alle altre parti del sensore.

Entrambi i sensori sfruttano l'effetto fotoelettrico ma si differenziano per le tecniche di elaborazione e costruzione dei dati. Già a livello di componenti notiamo una prima differenza. Nel sensore CCD abbiamo filtro colore, matrice di pixel e amplificatore, mentre le altre funzioni sono esterne al sensore stesso. Nel sensore CMOS, invece, sono presenti tutte le funzioni sopracitate compreso il controllore digitale e il convertitore A/D e altre permettendo un risparmio di spazio anche nel circuito stampato.

Anche a livello di output si riscontrano delle differenze.

Il pixel di un CCD fornisce infatti cariche elettriche, mentre quello CMOS emette già un segnale analogico, essendo ogni singolo pixel fornito di un proprio amplificatore di segnale ed essendo che il convertitore analogico digitale è normalmente inglobato nel

seniore. Nei sensori CCD il segnale analogico sarà realizzato solo all'uscita del sensore e quello digitale solo all'esterno.

I due sensori sono poi differenti se si va a considerare la velocità di trasferimento dell'informazione all'interno della matrice: nel CCD essa viene trasmessa di pixel in pixel fino al nodo di uscita e questo fa sì che ci sia necessità di tempo perché si arrivi in fondo al processo; nel sensore CMOS ogni pixel è direttamente collegato al nodo di uscita e questo identifica un minor tempo per compiere l'operazione (Figura 17).

Un elevato numero di amplificatori, come nel CMOS, porta però degli svantaggi come una maggior disomogeneità dell'immagine. Inoltre questo sensore ha un'area disponibile per la rilevazione della luce che risulta inferiore poiché al suo interno ha molte funzionalità.

Uno dei fattori che rende i CMOS competitivi nei confronti dei CCD è quello del consumo di potenza. Il sensore CMOS, sfruttando appunto tale tecnologia, è in grado di operare con tensioni di alimentazioni piuttosto basse e dispositivi sempre più miniaturizzati, il che comporta un consumo di potenza piuttosto basso. I CCD invece richiedono di operare con tensioni normalmente più elevate, il che comporta inevitabilmente una maggiore dissipazione di potenza.

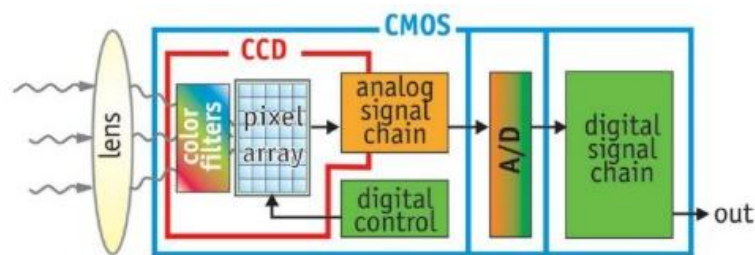


Figura 17: Confronto tra CCD e CMOS (appunti digitali website).

2.2.5 LA CORRELAZIONE AUTOMATICA

Grazie all'introduzione della fotogrammetria digitale si sono andate sviluppando tecniche automatiche, chiamate *Image Matching*, per l'identificazione dei punti omologhi. I punti omologhi sono punti visibili contemporaneamente su più fotogrammi e che sono quindi facilmente misurabili a livello di coordinate immagine. Questo è un passo fondamentale per la realizzazione di modelli e per il loro orientamento. Tale problema si sviluppa in quattro fasi principalmente:

- Si seleziona una porzione di immagine in una delle due immagini da mettere in relazione;
- Si identificano nella seconda immagine le corrispondenze;
- Viene calcolata la posizione tridimensionale delle entità nello spazio oggetto dell'entità in esame;
- Si valuta la qualità della procedura di *matching*.

Il punto cruciale, a volte difficile da risolvere, è la ricerca delle entità omologhe. Sono difficoltà dovute ad un numero eccessivo di operazioni che la macchina deve svolgere, alla possibilità di riscontrare ambiguità ed infine alla presenza di occlusioni.

Per far fronte a questi inconvenienti si può, in primis, ridurre l'area di ricerca delle entità. Questo viene fatto adottando delle strategie dovute al metodo delle *Linee Epipolari* che riducono appunto la ricerca del punto omologo alle linee stesse. La geometria epipolare descrive relazioni e vincoli geometrici che legano due immagini della stessa scena presa da due posizioni e assetti differenti.

Il piano epipolare è il piano individuato dai due centri di proiezione O_1 e O_2 e dal punto oggetto P (Figura 18). Le linee epipolari si formano per intersezione tra il piano epipolare e i piani dei fotogrammi. Queste consentono di ridurre enormemente la ricerca dei punti omologhi, limitandola alla linea stessa.

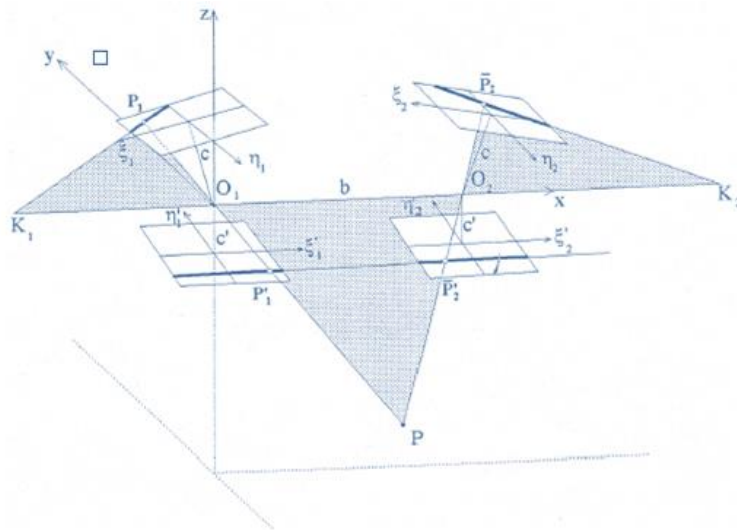


Figura 18: Geometria epipolare (modificata da Zanutta; 2015).

L'altro metodo adottato, per la stessa finalità, è chiamato *Vertical Line Locus* (VLL) che sfrutta anch'esso il concetto di geometria epipolare. Tale metodo viene mostrato in Figura 19, dove U e L rappresentano i punti di massima e minima quota attesa. Il punto S è il punto oggetto da ricercare e P è il punto medio del segmento UL. Se C' e C'' sono i centri di proiezione dei due fotogrammi e se si rappresentano i piani passanti per U, L e C' e U, L e C'', la ricerca del punto S nei due fotogrammi sarà ristretta alla linea creata dall'intersezione tra i piani epipolari e il piano immagine.

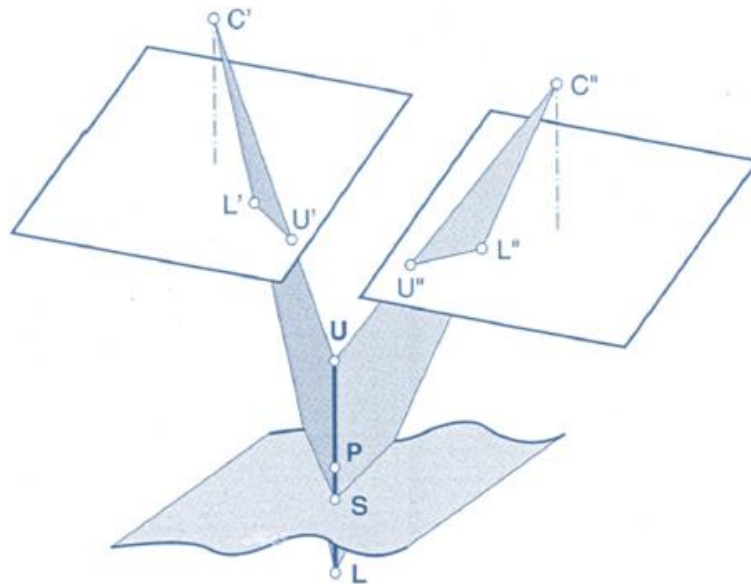


Figura 19: Vertical Line Locus (modificata da Zanutta; 2015).

Un ulteriore metodo per ridurre lo spazio di ricerca e fornito dalla possibilità di aumentare la dimensione del pixel e di realizzare la ricerca di corrispondenze su livelli d'immagine a differente risoluzione, da grossolana a fine. Questo prende il nome di *approccio gerarchico* (Figura 20).

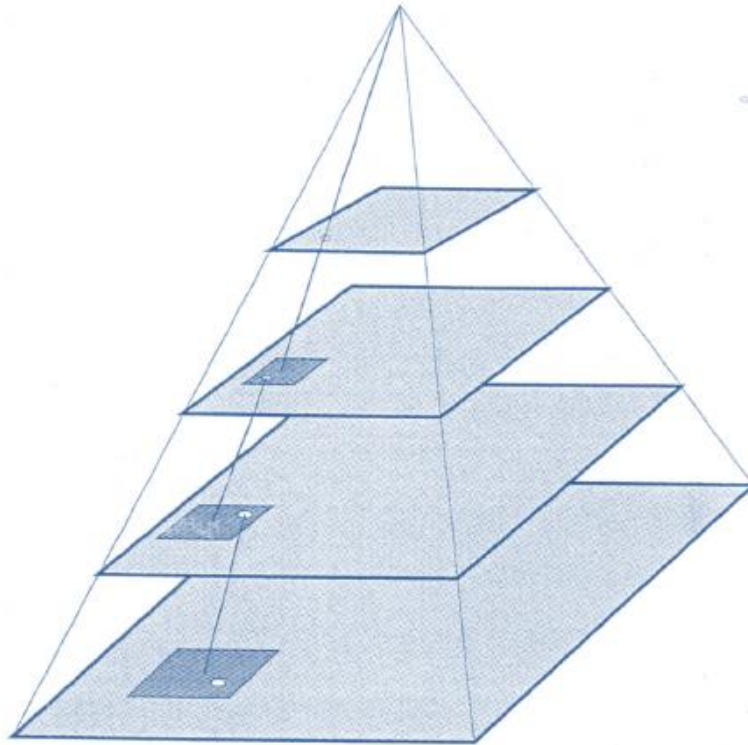


Figura 20: Approccio gerarchico: ogni livello ha dimensioni pari ad un quarto rispetto al precedente (modificata da Zanutta; 2015).

Per risolvere il problema di ambiguità sarà invece necessario adottare delle entità caratteristiche di dimensioni maggiori al pixel.

Infine per far fronte al problema delle oclusioni, l'unico modo sarà acquisire un maggior numero di fotogrammi.

2.2.5.1 CORRELAZIONE AREA BASED

La correlazione *Area Based* utilizza degli algoritmi che misurano la corrispondenza tra i pixel dei livelli di intensità radiometrica. Le immagini vengono convertite in livelli di grigio che successivamente vengono applicati agli algoritmi di ricerca che ne valutano il livello di corrispondenza, cioè la similitudine dei livelli di grigio.

Viene identificata una matrice detta *Sagoma* che rappresenta una porzione di immagine. Successivamente viene utilizzata una finestra di *Ricerca* tramite la quale si ricercano le corrispondenze. Infine si ha la finestra di *Correlazione* che rappresenta la porzione di immagine che viene ottenuta mettendo a confronto le due immagini da correlare.

La dimensione dell'immagine sagoma da considerare è molto importante. Aumentando la dimensione della matrice sagoma questa diviene sempre più caratteristica (le ambiguità nella ricerca di entità omologhe diminuiscono), ma, per contro, aumentano molto le distorsioni geometriche e quindi pixel adiacenti a quello centrale considerato, possono ricoprire porzioni di oggetto diverse.

I metodi usati principalmente per l'identificazione di entità omologhe sono due:

- Ricerca del massimo coefficiente di cross-correlazione;
- Metodo dei minimi quadrati per minimizzare la differenza dei livelli di grigio.

Il metodo più intuitivo è il primo, ovvero la ricerca del massimo di correlazione fra i valori di grigio di due finestre d'immagine. Spostando l'immagine mobile sulla prima fissa, si valuta un indice di correlazione r . Il massimo della funzione di cross correlazione definisce la posizione di migliore somiglianza tra la matrice di ricerca e la matrice sagoma (Figura 21).

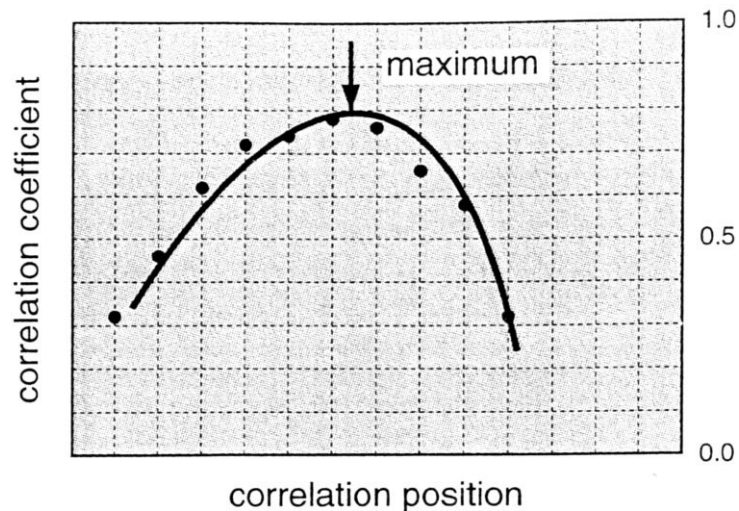


Figura 21: Andamento del coefficiente di correlazione lungo una linea epipolare: il valore massimo della curva interpolatrice individua la posizione del punto omologo (modificata da Zanutta; 2015)

2.2.5.2 CORRELAZIONE FEATURE BASED MATCHING

La correlazione *Feature Based Matching* (FBM) ricerca particolari significativi all'interno di fotogrammi. Attraverso degli operatori, definiti di interesse, vengono ricercati i punti di interesse.

Questi punti di interesse non sono però punti specifici, bensì delle feature, ossia dei raggruppamenti di pixel effettuati in modo tale che quelle porzioni di immagine risultino non ambigue e abbiano una qualche peculiarità. Una volta estratte queste feature, che possono essere locali o globali, vi si associa una descrizione per ognuna tramite dei cosiddetti descrittori. Questo consente poi di confrontare tra loro i descrittori stessi, permettendo di andare ad individuare le feature da correlare in immagini differenti.

Per comparare i descrittori la procedura più applicata è quella definita *quadratic matching procedure*, lenta ma rigorosa: la procedura consiste nella comparazione tra tutte le possibili combinazioni dei *keypoints* di una coppia di immagini e valutando come corrispondenze quelle combinazioni che hanno la minor distanza euclidea tra i vettori descrittori (*Nearest Neighbor Search*).

2.2.5.3 STRUCTURE FROM MOTION

Il termine *Structure from Motion* è stato utilizzato per primo da Ulman nel 1979 (Ulman; 1979). La ricostruzione della SfM è stata affrontata a partire dagli anni '90 con la diffusione delle camere digitali, in quanto era divenuta necessaria l'analisi di sequenze di immagini. La prima implementazione della tecnica è stata sviluppata da Noah Snavely, Steven Seitz dell'Università di Washington e da Richard Szeliski, Microsoft Research e pubblicata da Seitz e Szeliski nel 2006 (Seitz et al.; 2006). Contemporaneamente lo stesso Noah Snavely ha reso disponibile il codice sorgente, denominato *Bundler*, nel sito "PhotoTour" (Phototour web site).

In fotogrammetria, una delle fasi principali è quella dell'orientamento dei fotogrammi. L'obiettivo risulta dunque ricostruire la struttura spaziale di un oggetto o di una scena partendo da un database di immagini non strutturato, e disponendo di pochissime informazioni sui parametri di orientamento e sull'oggetto stesso.

Attualmente i metodi di risoluzione della SfM si basano su metodologie analoghe, descritte in Figura 22.

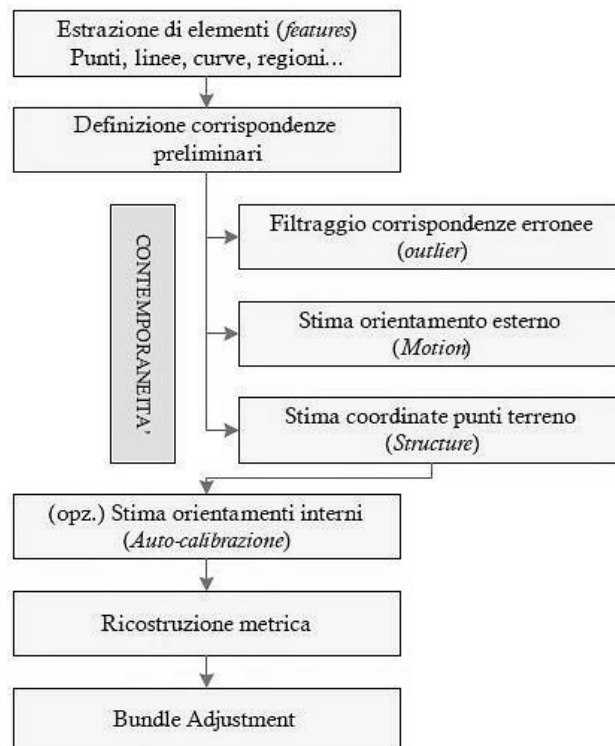


Figura 22: Schema generale per un problema di Structure from Motion (modificata da Roncella; 2007).

Inizialmente sulle singole immagini vengono selezionati una serie di elementi (normalmente puntuali) che, con un certo grado di probabilità, siano rintracciabili su più fotogrammi. Individuati un determinato numero di IP si cerca di catalogare, in primo tentativo, le corrispondenze omologhe attraverso criteri geometrici e radiometrici. Generalmente per fare ciò si fa uso della geometria epipolare o trifocale.

La geometria ricostruita non coincide ovviamente con quella reale, bensì rappresenta una geometria a livello proiettivo equivalente a quella reale. Per ottenere una ricostruzione reale è sufficiente la conoscenza dei parametri di orientamento interno che possono essere noti a priori oppure stimati direttamente.

Infine è possibile ottenere un modello ottimale tramite una stima ai minimi quadrati (*bundle adjustment*) in cui possono essere inserite informazioni quali punti di appoggio, inter-distanze note, etc. in modo da giungere a una completa definizione dei parametri di orientamento (*motion*) e alla ricostruzione della struttura della scena (*structure*).

Dunque il primo passaggio da dover effettuare è l'**ESTRAZIONE DI FEATURES** cioè l'estrazione di elementi interessanti di tipo puntuale che siano facilmente identificabili e rintracciabili in diversi fotogrammi.

Per selezionare, estrarre, dalle singole immagini, zone in cui esistono le migliori condizioni di interesse, vengono impiegati degli operatori matematici, definiti di interesse (*detectors*). Di questi operatori è interessante andarne a valutare l'efficienza intesa come capacità di estrarre punti omologhi. L'efficienza di un operatore di interesse è tanto maggiore, quanto maggiore è il suo grado di invarianza rispetto a trasformazioni geometriche e radiometriche (scala, illuminazione, etc.).

Gli operatori di interesse implementati maggiormente nella Structure from Motion sono i seguenti:

- *L'operatore di Harris*

Questo operatore è in grado di evidenziare lati e angoli usando un campionatore di dimensioni fisse che scansiona l'immagine alla ricerca di cambiamenti geometrici., considera una porzione di immagine che comprende il punto in esame e ne calcola la similarità con le porzioni vicine (Figura 23). Le coordinate 2D di ciascun IP vengono registrate qualora il campionatore determini una

variazione. Tramite il coefficiente di correlazione vengono determinate le variazioni geometriche, minimizzando la somma delle differenze quadrate dell'intensità tra le zone successivamente campionate dell'immagine. Un limite importante di questo operatore è rappresentato dal fatto che esso non è invariante rispetto alla scala ma solo alla rotazione.

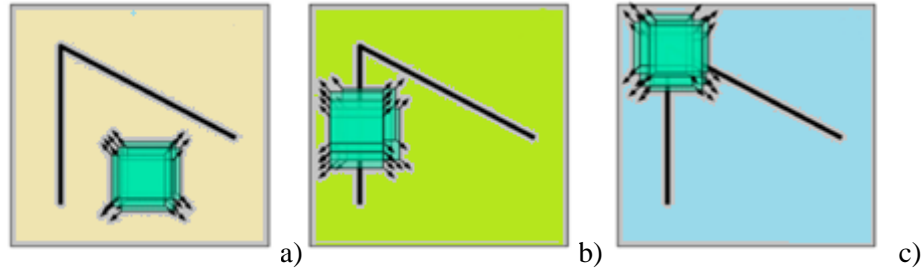


Figura 23: a) regione omogenea (non ci sono variazioni in tutte le direzioni), b) edge (non ci sono variazioni lungo la direzione dell'edge), c) corner (ci sono variazioni significative in tutte le direzioni) (modificata da Zanutta; 2015).

- *L'operatore SIFT (Scale Invariant Feature Transform)*

Questo operatore è un algoritmo per estrazione di feature pubblicato da David G. Lowe nel 1999. Esso utilizza un meccanismo raffinato per diminuire la presenza di falsi positivi (*outliers*). Tale procedura si basa sull'impiego della matrice Hessiana dello sviluppo di Taylor della DoG (differenza tra Gaussiane).

La matrice Hessiana è una matrice quadrata costituita dalle derivate parziali al secondo ordine di una funzione a valori scalari che in questo caso è la funzione che rappresenta la distribuzione dell'intensità radiometrica in scala di grigi.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \cdot \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \cdot \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Il metodo SIFT risulta invariante rispetto a scala, rotazione e illuminazione e ha la capacità di estrarre e associare punti di interesse anche in condizioni lontane dall'ipotesi di resa normale. A differenza dell'operatore di Harris non ricerca

punti omologhi su spigoli o discontinuità radiometriche, bensì su regioni più ampie dell'immagine (*region detector*). Dall'immagine di partenza viene realizzata una struttura dati in cui sono memorizzate immagini separate da intervalli di scala discreti; questi raggruppamenti vengono definiti ottave. Per ogni ottava, vengono calcolate le differenze tra gaussiane adiacenti i cui massimi sono memorizzati come punti di interesse (*keypoints*) (Lingua et al.; 2008). Perché un pixel sia identificato come punto di interesse deve essere un punto di massimo o di minimo tra gli 8 pixel adiacenti nella matrice DoG corrente, e nei 9 corrispondenti nella matrice DoG superiore ed inferiore (Figura 24).

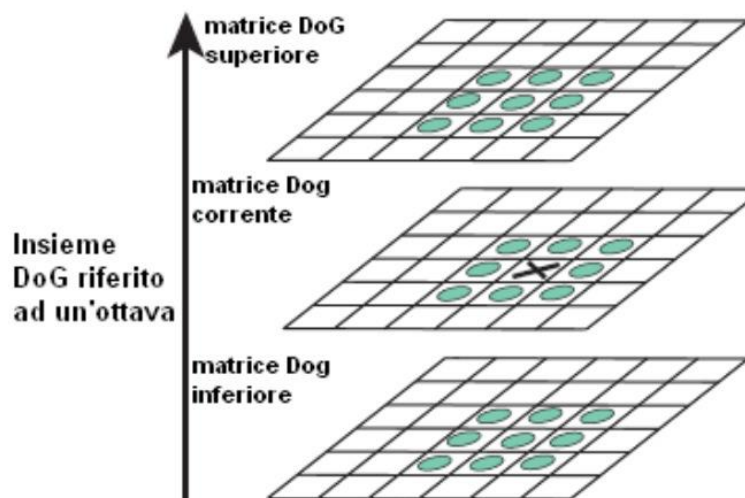


Figura 24: Ottava (modificata da Zanutta; 2015).

Per ogni punto individuato è definito un vettore che descrive i gradienti radiometrici nell'intorno del punto di interesse.

Raggruppando quindi i vettori di tutti i pixel si forma un istogramma di gradienti orientati i cui picchi rappresentano le direzioni dominanti (Figura 25).

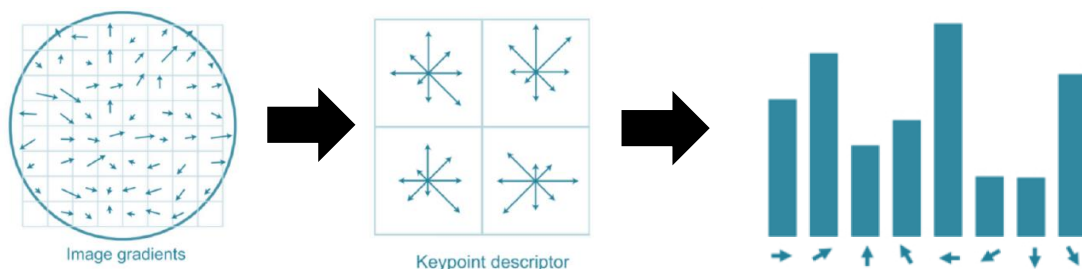


Figura 25: Formazione istogramma di gradienti (modificata da Zanutta; 2015).

La seconda fase riguarda la **DETERMINAZIONE DELLE COPPIE OMOLOGHE**, fase di notevole interesse in quanto gli accoppiamenti che vengono realizzati, verranno trascinati fino alla fine dell'elaborazione. Per questo motivo è importante “portarsi dietro” il minor errore possibile, per evitare di ottenere prodotti non soddisfacenti o indesiderati.

La fase di *matching* è quindi una fase cruciale che risulta oltretutto complessa poiché non è realizzata tramite procedimenti analitici semplici ma può essere soggetta a errori e può necessitare di attenzione particolare in funzione del caso specifico che si sta analizzando.

La rimozione dei valori anomali (*outliers*) viene realizzata applicando un approccio basato su RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*). Tale stimatore è stato pubblicato per la prima volta da Fischler e Bolles nel 1981. È un metodo iterativo che permette la stima di parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati contenente outlier.

Il procedimento iterativo del RANSAC nella SfM consiste in:

- Selezionare un subset di tentativo delle corrispondenze preliminari tra due fotogrammi (*inliers*);
- Calcolare i parametri che ne descrivono la geometria epipolare;
- Testare tutte le altre corrispondenze nei confronti del modello trovato;
- Il modello stimato è ragionevolmente valido quando la maggioranza dei punti rientra nei livelli di confidenza, quelli al di fuori vengono scartati come outliers.

Questo processo viene compiuto in modo consecutivo su tutte le coppie di immagini che mostrano corrispondenze.

Al termine delle procedure descritte fino ad ora, ci si trova davanti ad un blocco ripulito da tutti gli errore grossolani. Tuttavia il blocco che viene restituito fornisce una geometria solo equivalente a quella reale ma non verifica le condizioni reali. Questo è dovuto al fatto che la forma e i parametri sono stati calcolati a partire dalle sole coordinate immagine, senza sfruttare eventuali caratteristiche quali prenoscenze sulla geometria dell'oggetto (punti d'appoggio). Questo può esser fatto compiendo una

compensazione in blocco ai minimi quadrati delle equazioni dei raggi proiettivi di ciascun punto di legame tra le immagini (**Bundle Block Adjustment**).

In contemporanea al *bundle block adjustment* viene realizzata una calibrazione automatica (self-calibration) dei parametri di distorsione interna delle camere, oltre che l'orientamento interno ed esterno di ciascun fotogramma.

L'auto calibrazione può essere eseguita inserendo o meno dei vincoli dati dalla geometria dello spazio oggetto, in genere nella forma di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (PFA). Un vincolo minimo per definire il datum del network è sempre richiesto, questo può essere impostato attraverso vincoli interni, free-network adjustment, o attraverso un'esplicita configurazione minima di GCP (arbitrari o reali).

L'auto calibrazione basata sui *tie-points* valutati grazie alle tecniche SfM è per l'appunto una compensazione in blocco che impiega come solo vincolo interno la focale presente negli *header* (Exif) dei fotogrammi digitali. Tale valore è richiesto solo come valore di primo tentativo per le iterazioni di raffinamento dei parametri intrinseci ed estrinseci della rete di prese. La focale (c), insieme alle coordinate immagine (x_0, y_0) del punto principale, rappresentano appunto i parametri intrinseci (POI) delle camere, mentre le coordinate 3D (X_0, Y_0, Z_0) del centro di proiezione e l'assetto (ω, ϕ, k) della camera rispetto al datum sono i parametri estrinseci (POE).

3. IL LASER SCANNING

TERRESTRE

Il L.A.S.E.R., acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (cioè amplificazione della luce per mezzo dell'emissione stimolata di radiazioni), è un dispositivo per ottenere fasci intensi ed estremamente concentrati di radiazioni elettromagnetiche coerenti (cioè in relazione di fase non variabile sul tempo) nei campi dell'infrarosso, del visibile e dell'ultravioletto. Dal punto di vista applicativo il laser è una strumentazione che consente di trasformare la natura dell'energia, così da passare da una forma di energia primaria (elettrica chimica o nucleare) ad un fascio monocromatico coerente di radiazioni elettromagnetiche di elevata intensità: la luce laser (Bornaz; 2006).

I fondamenti teorici dell'emissione stimolata di radiazione sono frutto di un'intuizione di A. Einstein e sono contenuti nella teoria quantistica dell'emissione e assorbimento pubblicata nel 1917, le prime applicazioni pratiche si ebbero solo intorno agli anni '50 nell'ambito delle ricerche sui campioni di frequenza od orologi atomici, durante le quali si comprese che il mezzo attivo consentiva l'amplificazione di radiazioni per emissione stimolata. Nel 1958 i fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes brevettarono il primo dispositivo laser, ma il primo esemplare di laser funzionante è da attribuire al fisico statunitense Theodore Maiman e fu realizzato nel 1960.

3.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL LASER

La luce è costituita da fotoni emessi spontaneamente dagli atomi. Fotoni di diverse lunghezze d'onda trasportano quantità di energia differenti: in modo particolare, minore è la lunghezza d'onda, maggiore sarà la quantità di energia trasportata. Di conseguenza la lunghezza d'onda della luce emessa da un atomo dipende dalla quantità di energia associata con ogni possibile salto di elettrone. Per ottenere un'emissione stimolata di fotoni, è necessario utilizzare atomi eccitati, i cui elettroni si trovino quindi in uno stato di energia più elevato: si deve quindi alterare la distribuzione degli atomi in modo da avere un elevato numero di atomi eccitati, capaci quindi di emettere energia (processo di *population inversion*); irradiando questi elettroni mediante un fascio di luce, gli atomi rilasciano energia in forma di luce. Quando questo fotone colpisce l'atomo eccitato, lo stimola a rilasciare energia in forma di luce. L'emissione luminosa indotta ha la stessa lunghezza d'onda e la medesima fase del fotone che l'ha generata, in altre parole, il fotone che colpisce l'atomo genera l'emissione di un secondo fotone ad esso identico. Il nuovo fotone colpirà un altro atomo eccitato causando l'emissione di un secondo fotone e così via; ciò che si ottiene è quindi una cascata di emissioni stimolate, cui si dà il nome di laser.

Ciò che costituisce il laser è dunque energia elettromagnetica, come la luce naturale, ma mentre in questa i fotoni vengono emessi in tutte le direzioni e con lunghezze d'onda diverse, nel laser la luce è usualmente monocromatica, consistente cioè di una singola lunghezza d'onda, ed emessa con un raggio molto ristretto.

Per capire come si genera il raggio laser si osservi la Figura 26; il mezzo che viene eccitato e libera i fotoni che formano il raggio laser, può essere la combinazione di due o più elementi, come elio e neon. Mediante il processo di *population inversion* il mezzo viene eccitato ed è quindi capace di emettere luce quando viene colpito da un fotone. La consistenza dell'effetto a cascata cresce con la distanza che la luce percorre attraverso il mezzo del laser, per questo motivo il materiale di supporto è costituito da una barra allungata attraverso cui viene emessa la luce. Inoltre per incrementare l'intensità del raggio vengono posizionati due specchi alle estremità della barra, in questo modo la

luce è costretta a percorrere più volte la barra, incrementando la distanza percorsa prima di lasciare la barra stessa. L'oscillazione della luce attraverso la cavità del laser causa la formazione di un fascio laser ristretto. Il raggio del fascio dipende dalla distanza percorsa dalla luce attraverso il mezzo.

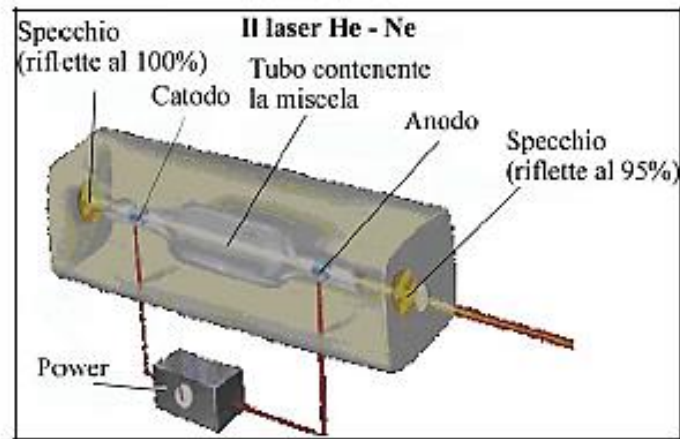


Figura 26: Esempio di creazione di un raggio laser.

In conclusione, il laser, non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa aventi particolari caratteristiche:

- Deve essere composta da una sola frequenza di luce, non come la luce di una torcia che pur sembrando bianca (o colorata a seconda della lampadina utilizzata) è composta da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano (*monocromatica*);
- Deve essere composta da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni come quella delle sorgenti di tipo tradizionale, ma si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità (*coerenza spaziale o unidirezionalità*);
- Deve essere costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una e all'altra originando un treno di luce che può essere spinto ad elevata intensità e ad elevata potenza (*coerenza temporale*).

Una radiazione luminosa può avere una lunghezza d'onda differente (Figura 27). Nel caso del laser l'onda luminosa può essere ultravioletta (avere cioè una lunghezza d'onda compresa tra i 200 e i 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 300 nm).

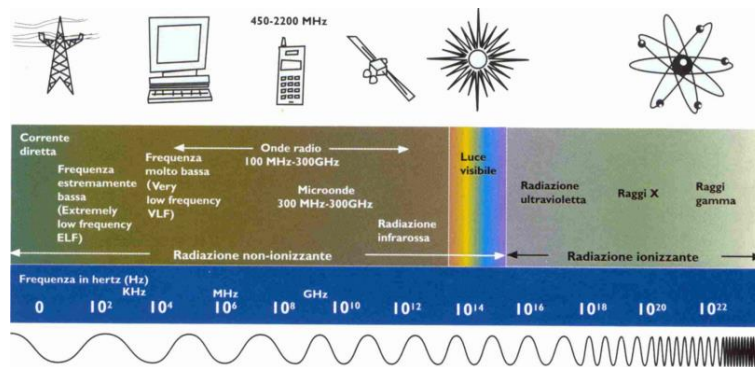


Figura 27: Schematizzazione dello spettro elettromagnetico (Bornaz; 2006).

3.2 CLASSIFICAZIONE

I laser si possono classificare in base a:

- Elementi utilizzati per la generazione del raggio;
- Rischi connessi all'uso del laser stesso;
- Principio di funzionamento.

Per quanto riguarda gli **elementi per la generazione del raggio**, la suddivisione è la seguente:

- Laser a stato solido: gli atomi che emettono la luce sono dispersi in un materiale cristallino o vetroso mischiato ad altri elementi (il materiale capace di emettere luce risulta circa l'1% sul totale); questi laser hanno di solito l'aspetto di una barra di piccolo diametro, che consente di generare il raggio e contemporaneamente dissipare il calore prodotto.
- Laser a gas: i laser che utilizzano miscele di gas, tipicamente eccitate tramite scarica elettrica, costituiscono un gruppo piuttosto ampio e possono emettere sia in continuo che in modo intermittente.
- Laser a semiconduttore: la congiunzione attraversata da corrente permette di generare l'emissione della luce; a differenza delle categorie precedenti, questa tipologia emette il raggio soprattutto in modo pulsante per consentire la dissipazione del calore.

- Laser a liquido: in questi laser il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico, chiuso in un recipiente in vetro. Sono pompati con potenti lampade flash per operare nella modalità a impulsi oppure con un laser a gas ausiliario per operare nella modalità a onda continua. La frequenza caratteristica di questi laser può essere regolata utilizzando un prisma posto all'interno della cavità.
- Laser ad elettroni liberi: questi laser producono la luce utilizzando gli elettroni liberi di un plasma, i quali si muovono a spirale (e quindi emettono radiazione perché accelerati) seguendo le linee di un campo magnetico. La loro frequenza è regolabile ma può coprire l'intera porzione dello spettro che va dai raggi infrarossi ai raggi X. Nel Laser ad elettroni liberi non si usa un sistema di atomi o molecole come mezzo attivo, bensì un fascio di elettroni relativistici. Questi vengono costretti su una traiettoria oscillante da un campo magnetico statico variabile nello spazio (generato da un oggetto detto ondulatore magnetico), per cui, come tutte le cariche accelerate, perdono energia emettendo radiazione.

Un'ulteriore classificazione è legata ai **rischi** connessi all'uso del laser stesso che sono sia quelli relativi alle caratteristiche intrinseche del fascio, sia quelli derivanti dalle apparecchiature che permettono di creare e mantenere questo tipo di radiazione. L'interazione diretta con il fascio interessa in modo particolare gli occhi e la pelle. L'occhio, per la sua funzione anatomica e per il suo comportamento ottico, è l'organo più vulnerabile nei confronti della luce laser e rappresenta pertanto l'organo critico per eccellenza; mentre per la cute, il danno a carico della luce è di minore importanza ma laser di potenza notevolmente elevata possono danneggiare seriamente anche gli organi interni.

La grande varietà di lunghezze d'onda, energie e caratteristiche d'impulso dei laser e sistemi che includono laser, e delle applicazioni e dei modi di impiego di tali sistemi, rendono indispensabile, ai fini della sicurezza, il loro raggruppamento in categorie, o classi, di pericolosità. È risultato molto utile l'introduzione di un parametro chiamato Limite di Emissione Accettabile (LEA), che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser, la cui valutazione permette la collocazione dell'apparecchio nell'opportuna categoria di rischio. La determinazione del LEA deve essere effettuata

nelle condizioni più sfavorevoli ai fini della sicurezza. A tale scopo sono state individuate 5 classi (1, 2, 3 A, 3B, e 4) con indice di pericolosità crescente con il numero di classe:

- Classe 1: laser sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevoli;
- Classe 2: laser che emettono radiazioni visibili. L'occhio è protetto dalle reazioni di difesa, compreso il riflesso palpebrale;
- Classe 3 A: laser sicuri per visione a occhio nudo. La visione di laser 3 A con strumenti ottici (binocoli, telescopi) può essere pericolosa;
- Classe 3B: la visione diretta di questi laser è sempre pericolosa, anche la visione di riflessione è pericolosa;
- Classe 4: laser che producono riflessioni pericolose, provocando lesioni alla pelle e pericolo di incendio. Richiedono estrema cautela per l'utilizzo.

Infine, si ha una suddivisione del laser in base al **principio di funzionamento**. A tale scopo si possono distinguere fondamentalmente due tipologie, approfondite nei capitoli successivi:

- I laser distanziometrici;
- I laser triangolatori.

3.3 COMPORTAMENTO DEL LASER A CONTATTO CON I MATERIALI

Quando una radiazione colpisce la superficie di un corpo reale (detto anche corpo rigido), essa è in parte assorbita in parte riflessa ed in parte trasmessa (Figura 28).

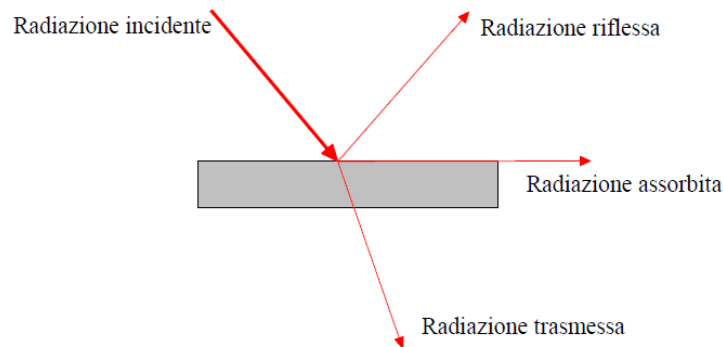


Figura 28: Comportamento di una radiazione luminosa a contatto con un corpo grigio (Bornaz; 2006).

Si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 e 1), che misurano le interazioni tra energia e materia.

- Assorbività (α): è il rapporto $\frac{E_A}{E_I}$ tra l'energia assorbita e quella incidente;
- Riflettività (ρ): è il rapporto $\frac{E_R}{E_I}$ tra l'energia riflessa e quella incidente;
- Trasmissività (τ): è il rapporto $\frac{E_T}{E_I}$ tra l'energia trasmessa e quella incidente.

Da notare è che lo stesso materiale ha un comportamento differente rispetto a lunghezze d'onda differenti. I coefficienti indicati sono funzione della lunghezza d'onda, cioè:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha(\lambda) \\ \rho &= \rho(\lambda) \\ \tau &= \tau(\lambda)\end{aligned}\tag{1}$$

Inoltre per il principio di conservazione dell'energia si ha che:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Questa dipendenza è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'oggetto.

Considerando solo la parte di energia riflessa (ρ) dalla superficie, se un fascio luminoso incide su una superficie liscia di acciaio si forma un raggio riflesso ben definito, mentre se arriva su un foglio di carta la luce viene riflessa più o meno in tutte le direzioni (riflessione diffusa). La differenza tra riflessione diffusa e speculare trova la sua ragione nel concetto di ruvidità delle superfici. Il comportamento geometrico della componente riflessa del raggio incidente è governato dal cosiddetto criterio di Rayleigh, per cui una superficie è considerata rugosa se:

$$\Delta h \geq \frac{\lambda}{8 * \cos\theta} \quad (3)$$

Dove

Δh è la dimensione verticale media delle asperità superficiali della superficie (m);

λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente (m);

θ è l'angolo di incidenza dell'onda rispetto alla verticale (rad).

Da notare il fatto che il concetto di rugosità di una superficie è funzione della lunghezza d'onda incidente la superficie stessa. In generale le superfici perfettamente lisce riflettono in modo speculare, quelle perfettamente rugose si comportano come riflettori lambertiani, ovvero la direzione di riflessione è indipendente da quella di incidenza. Normalmente le superfici reali non si comportano né da superficie perfettamente speculare né da superficie perfettamente lambertiana ma si comportano in modo intermedio (Figura 29).

Esiste poi una particolare superficie che non si comporta né da superficie speculare né da superficie lambertiana. Si tratta delle superfici così dette retro-riflettenti. Per queste particolari superfici il raggio riflesso si propaga esattamente lungo la stessa direzione del raggio coincidente (Figura 30). Questa proprietà è valida inoltre per un elevato numero di direzioni di incidenza.

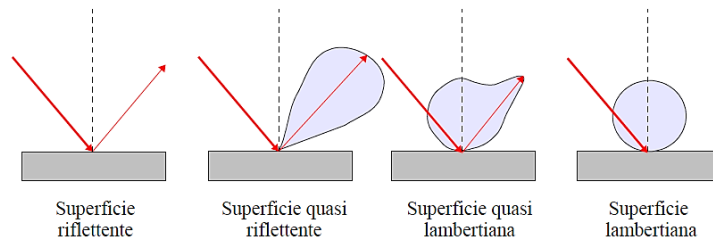


Figura 29: Comportamento riflettivo delle superfici (Bornaz; 2006).

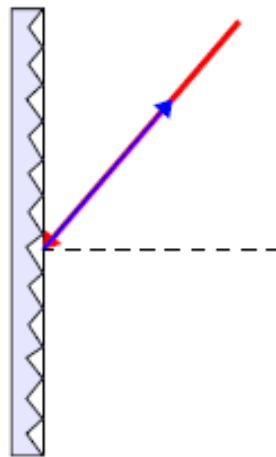


Figura 30: Comportamento riflettivo delle superfici retro-riflettenti (Bornaz; 2006).

3.4 SENSORI LASER SCANNER TERRESTRI

I laser oggi presenti sul mercato del rilevamento sono sempre più precisi ed affidabili e possono misurare la posizione di punti ad elevata velocità. L'unione di un distanziometro con queste caratteristiche ad un insieme di apparati meccanici di alta precisione ha reso possibile la realizzazione dei sensori laser scanner. La meccanica dello strumento permette di materializzare una direzione di acquisizione mentre il distanziometro laser acquisisce una distanza lungo la direzione stessa. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti sparsi nello spazio in modo più o meno regolare che comunemente viene chiamata "nuvola di punti". I laser scanning presenti oggi sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità di acquisizione.

Nonostante le molteplici differenze tra di essi è possibile classificare i sensori laser in alcuni gruppi principali a seconda del principio di acquisizione:

- Laser scanner distanziometrici;
- Laser scanner triangolatori.

3.4.1 LASER SCANNER DISTANZIOMETRICI

I laser scanner distanziometrici possono facilmente essere paragonati alle stazioni totali topografiche. La misura della posizione tridimensionale del punto avviene infatti in coordinate sferiche. Per ogni punto acquisito sono misurati un angolo orizzontale (azimutale), un angolo verticale (zenitale) ed una distanza inclinata. Per questo motivo spesso i sistemi a scansione laser terrestri sono considerati stazioni totali ad elevata automazione (Figura 31).

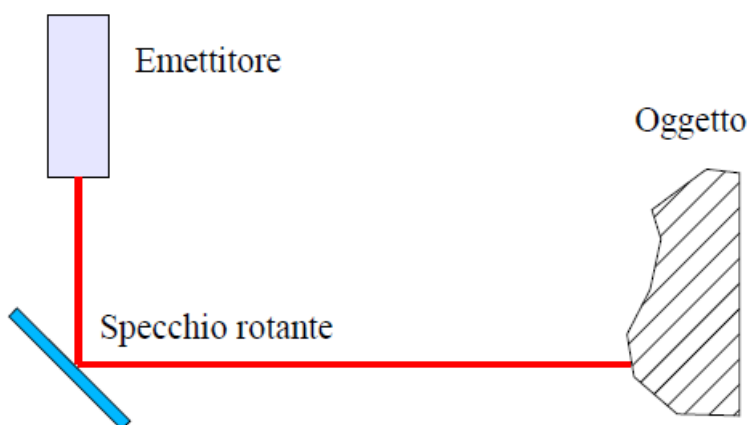


Figura 31: Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico (Bornaz; 2006).

Esiste però una sostanziale differenza tra i rilevamenti topografici con stazione totale e le acquisizioni laser scanner. Quando si effettua un rilievo topografico classico sono misurate le coordinate di punti particolari appartenenti all'oggetto, che devono essere ben riconoscibili all'occhio e che definiscono in genere la sagoma dell'oggetto stesso, come ad esempio spigoli, fessure, ecc.

Nel caso di un rilevamento laser scanner invece non vi è alcuna possibilità di scegliere i punti da rilevare. È possibile in genere definire solo l'area che si vuole acquisire e le

densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica. Il risultato del rilevamento è una nuvola di punti molto densa ma con gli stessi distribuiti in modo casuale sull'oggetto. Non sono quindi in genere rilevati i punti che classicamente sono misurati con le tecniche di topografia classica.

I laser scanner distanziometrici in genere sono dotati di distanziometri laser ad impulsi (che misurano quindi il tempo di volo) in quanto permettono di effettuare misure molto velocemente (circa 10000 punti al secondo) con precisioni elevate (dell'ordine di 5-10 mm). La portata massima oggi raggiungibile con un sensore laser di classe 1 (quindi non pericolo per la vista) è di circa 800 m.

Se la distanza viene invece misurata per differenza di fase lo strumento è più lento ma più preciso e la portata di acquisizione diminuisce.

3.4.1.1 DISTANZIOMETRI AD IMPULSI

Il principio su cui si basa questo metodo di misura della distanza è concettualmente semplice. Si tratta di misurare il tempo Δt impiego da un impulso luminoso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa (Figura 32).



Figura 32: Misura di distanza ad impulso (Bornaz; 2006)

Nota la velocità di propagazione dell'impulso (v) è possibile calcolare la distanza percorsa dal laser (D) conoscendo il tempo impiegato dall'impulso (Δt):

$$2D = v * \Delta t \quad (4)$$

Le prime applicazioni di questo metodo sono state realizzate in ambito militare e nei sistemi di misura satellitari S.L.R. (*Satellite Laser Ranging*). In questo caso particolare l'impulso emesso, di tipo laser, possedeva tuttavia potenze tali da non essere applicabile in campo civile costituendo un pericolo per la vista.

La potenza emessa è oggi facilmente variabile e può quindi essere resa compatibile con le esigenze degli impieghi civili. Di maggior rilievo è invece il problema della precisione richiesta per le applicazioni di tipo geodetico e topografico. Affinché la distanza D abbia una precisione di 10^{-5} occorre che sia v (velocità) che Δt (intervallo di tempo misurato) siano determinabili con la medesima precisione.

Per distanze notevoli l'orologio di riferimento determina in modo esatto solo il numero di lunghezze d'onda contenute nell'intervallo di tempo Δt tra il segnale emesso e quello ricevuto (Figura 33).

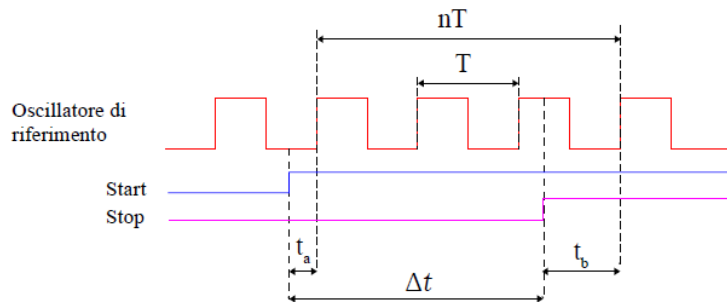


Figura 33: Misura del tempo trascorso.

Chiamando con T il periodo della frequenza fondamentale f (il periodo T sarà pari a $1/f$), l'intervallo Δt tra lo Start (partenza del segnale) e lo Stop (arrivo del segnale) sarà:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b \quad (5)$$

Per distanze minori a 10 m il valore è uguale a zero.

Il valore di n è noto in quanto la distanza approssimata è nota con precisione migliore del decametro. Una precisione dell'ordine del decametro non è però sufficiente nel campo del rilevamento di una distanza in topografia o nella applicazioni affini.

È necessario quindi procedere ad un affinamento della misura del tempo entro un periodo di oscillazione (T). Il tempo impiegato dall'impulso è pari al numero di periodi interno trascorsi (nT) e dai tempi residui compresi tra lo Start (t_a) e lo Stop (t_b) e la prima oscillazione di riferimento immediatamente successiva. Ciò è dovuto al fatto che l'oscillatore di riferimento viene attivato all'accensione dello strumento e non al comando di start dell'impulso, con il quale, quindi, non risulta in genere sincronizzato.

Per misurare con precisione t_a e t_b si usa un convertitore tempo tensione: esso è costituito da un condensatore che viene caricato, per un tempo di carica corrispondente ad un periodo di oscillazione (T). Quindi risulta facile, con una semplice proporzione, ricavare i tempi residui richiesti in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore (Figura 34).

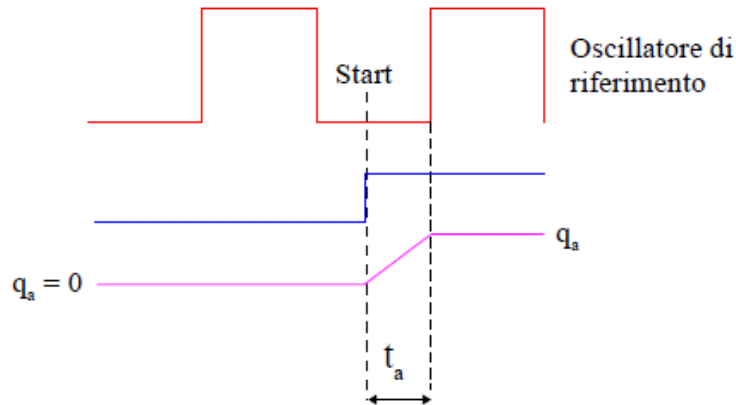


Figura 34: Misura del tempo t_a .

Indicando con q la tensione raggiunta dal condensatore nel tempo t e con Q la tensione raggiunta nel periodo T si avrà:

$$\frac{t}{q} = \frac{T}{Q} \quad (6)$$

Con t si indicano successivamente t_a e poi t_b .

Dopo ogni misura di tensione ed entro un intervallo che al massimo deve durare un ciclo, il condensatore viene scaricato. Questo condensatore viene cioè aperto dal segnale di start e chiuso dalla prima rampa del segnale dell'oscillatore.

Per la misura di t_b , essendo il segnale ricevuto molto debole, si preferisce fare la misura dopo aver modulato questo segnale con la frequenza data dallo stesso circuito di oscillazione. Un "circuito rivelatore di zero" misura t_b come primo zero della sinusoide smorzata che si ottiene come risultato di detta operazione.

Per poter effettuare misure di tempo più precise, non si può prescindere dai ritardi di fase dell'orologio interno dovuti ai ritardi parassiti dell'elettronica dei circuiti interni o di altri sistematismi qui non trascurabili.

Per questo motivo, oltre alla “esterna” del tempo, cioè del segnale di ritorno, avviene anche una misura interna di calibrazione, catturando prima dell’uscita, una parte del segnale emesso e misurandone il tempo di percorrenza nei circuiti, cioè a distanza nulla. Questi tempi assumono valori rilevanti in relazione ai tempi normalmente in gioco (ad esempio si possono avere ritardi di 100 μ s cui corrisponderebbe una distanza misurata di circa 15 km).

Poiché entrambi i segnali percorrono lo stesso circuito interno, sottraendo al tempo misurato quello di calibrazione, è possibile ricavare il tempo del solo percorso esterno.

3.4.1.2 DISTANZIOMETRI A MISURA DI FASE

Il funzionamento si basa sull’emissione di una radiazione ottica con lunghezza d’onda corrispondente all’infrarosso vicino che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest’ultimo riflette una parte dell’onda verso l’apparecchio ricevente che interpreta la differenza di fase tra l’onda emessa e quella ricevuta. Questo sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro ed il prisma. I distanziometri a misura di fase sono dunque composti da due parti, una trasmittente ed una ricevente.

L’esigenza di mantenere concentrata l’energia dell’onda emessa, e quindi di poterne riceverne di ritorno una buona parte, fa sì che si debbano utilizzare onde con lunghezza d’onda molto piccola (infrarosso vicino). Invece per poter discriminare la fase con precisione è necessario utilizzare una lunghezza d’onda metrica. Bisognerà quindi modulare opportunamente l’onda elettromagnetica.

Si consideri, ad esempio, il caso di un’onda qualsiasi con una lunghezza d’onda (λ) e si supponga di voler misurare, utilizzando questa onda, una distanza che sia inferiore alla metà di λ . L’onda dopo aver percorso la distanza D si riflette sull’estremo opposto e ritorna al punto di partenza (Figura 35).

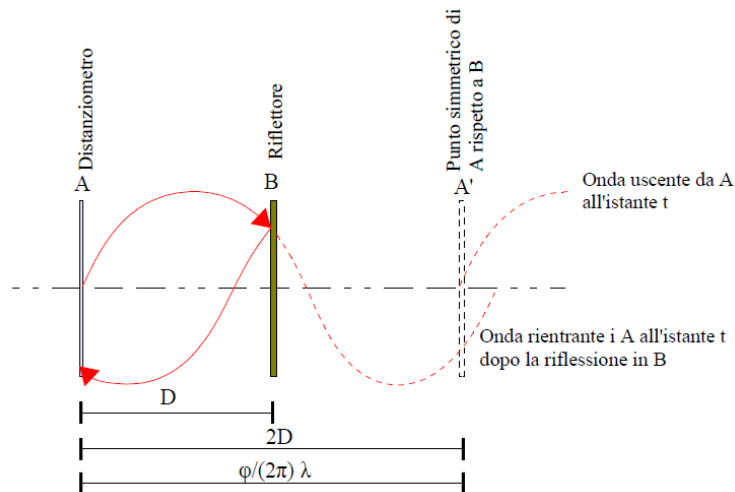


Figura 35: Principio della misura della distanza per differenza di fase, caso con $D < \lambda/2$.

Lo sfasamento misurabile tra l'onda trasmessa e l'onda ricevuta sarà funzione della distanza D . La distanza tra A (punto di emissione) e B (punto di riflessione) è la distanza che si desidera misurare (D). Si indica con A' il punto simmetrico di A rispetto a B (che dista quindi da A $2D$). Il punto A', nel caso non ci fosse riflessione in B, sarebbe raggiunto dall'onda nell'istante generico t .

Per il generico istante t è possibile scrivere il valore dell'ampiezza dell'onda:

$$S_e = A * \text{sen}(\omega t * \varphi_0) \quad (6)$$

Dove:

Se è l'ampiezza dell'onda,

A è l'ampiezza massima,

Ω è la pulsazione ($\omega=2\pi f$),

f è la frequenza,

φ_0 è la fase iniziale,

λ è la lunghezza d'onda ($\lambda=c/f$),

c è la velocità di propagazione.

Per l'onda riflessa, tenendo conto che un determinato valore dell'oscillazione si propaga con velocità c e che quindi l'onda rientrante riproduce i valori dell'onda uscente con un ritardo di $\Delta t = (2D)/c$ si avrà:

$$S_r = A * \text{sen}(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0) = A * \text{sen}(\omega t - \omega \Delta t + \varphi_0) = A * \text{sen}(\omega t - \varphi + \varphi_0) \quad (7)$$

Dove con $\varphi = \omega \Delta t$ si indica lo sfasamento tra l'onda uscente e l'onda rientrante.

Dalla relazione che indica lo sfasamento si avrà:

$$\varphi = \omega \Delta t = \omega \frac{2D}{c}$$

$$2D = \frac{c\varphi}{\omega} = \frac{c\varphi}{2\pi f} = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda \quad (8)$$

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} * \frac{\lambda}{2}$$

Da cui si può dedurre che misurando lo sfasamento $\Delta\varphi$ tra l'onda uscente e l'onda rientrante si può ottenere la distanza D come una frazione di metà della lunghezza d'onda impiegata (il rapporto $\varphi/(2\pi)$ varia tra 0 e 1). Lo strumento che misura lo sfasamento tra le due onde si chiama discriminatore o comparatore di fase.

Considerando invece il caso in cui il punto di riflessione B sia distante da A di un numero intero di mezze lunghezze d'onda (A si sposta di un numero intero di lunghezze d'onda), è evidente che lo sfasamento non cambia perché lungo il percorso $2D$ si viene ad inserire un numero intero di lunghezze d'onda e si potrà quindi scrivere l'equazione fondamentale dei distanziometri ad onde:

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} * \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2} \rightarrow D = L + n \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

Il numero intero n si chiama ambiguità. Per misurare una distanza con un distanziometro ad onde occorre quindi misurare lo sfasamento φ e valutare, senza errore, il numero intero di mezze lunghezze d'onda. È bene puntualizzare che con qualunque distanziometro ad onde la misura dello sfasamento $\Delta\varphi$ permette sempre e solo di valutare quella porzione di distanza che eccede il numero intero di mezze

lunghezze d'onda in essa contenuto e che il numero n si può valutare con modalità diverse.

I problemi di misura consistono quindi nel ricavare lo sfasamento φ e l'ambiguità n .

3.4.2 LASER SCANNER TRIANGOLATORI

I laser scanner triangolatori sono strumenti che, per la misura della posizione di punti, utilizzano il principio analogo a quello della triangolazione topografica, ovvero dell'intersezione in avanti. Si tratta di strumenti di forma allungata a tubo dotati di un diodo emettitore e di un diodo ricevitore posizionati agli estremi dello strumento stesso. Il segmento che unisce i due diodi è chiamato comunemente base e la sua dimensione non può in genere superare alcuni limiti pratici di maneggevolezza (circa 1 m). Ne consegue ovviamente un limite nella portata dello strumento (Figura 36).

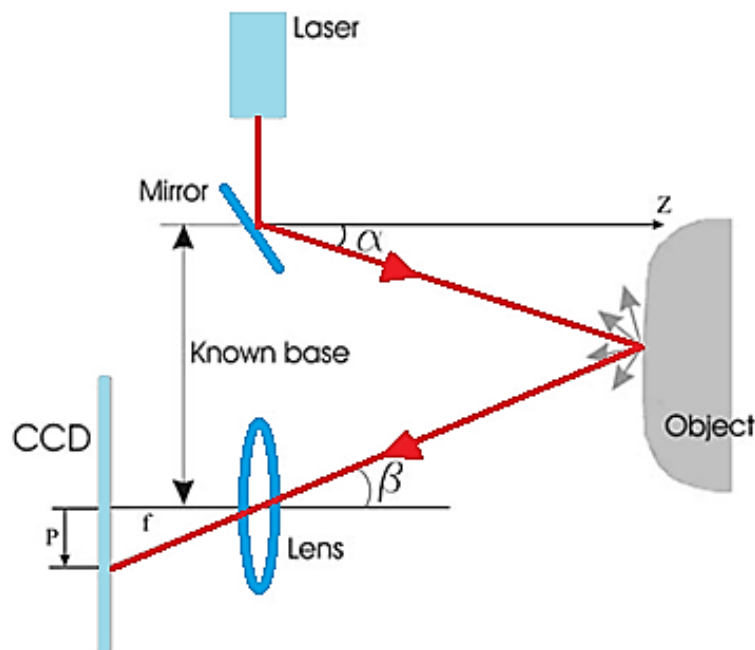


Figura 36: Principio di funzionamento dell'intersezione in avanti in un laser a triangolazione (modificata da Bitelli; 2015).

Per la determinazione della posizione del punto acquisito si utilizzano la base "b" (di entità nota in quanto caratteristica intrinseca dello strumento) e due angoli misurati in fase di acquisizione cioè l'angolo α (angolo di emissione), che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento, e l'angolo β (angolo di ricezione) che si forma tra il

raggio riflesso e la base. Tale geometria di acquisizione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub-millimetriche), portate limitate (dell'ordine di qualche metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati. Nel particolare, si assume un sistema cartesiano solidale allo strumento e posizionato con l'origine nel centro dello specchio, l'asse x congiungente quest'ultimo e il centro di proiezione del sistema ottico, ed infine l'asse z ortogonale a x. Le grandezze mostrate in Figura 36 rappresentano la distanza focale (f), la distanza dal centro ottico (P) e la distanza incognita fra strumento ed oggetto (z).

L'emettitore produce un raggio laser che grazie ad una preventiva calibrazione della rotazione dello specchio rotante, esce dallo strumento con un'angolazione α nota e va ad incidere la superficie dell'oggetto da misurare. Il raggio laser subisce una riflessione la cui entità è funzione del tipo di superficie colpita, ed una parte del segnale riflesso viene ripresa dal sensore di ricezione posizionato ad una distanza nota dall'emettitore chiamata baseline (b). L'angolo β è incognito ma, tramite la conoscenza della distanza focale e della posizione del segnale registrata nell'array dal sensore piano, è possibile applicare il teorema degli angoli opposti e risalire per via indiretta al valore dell'angolo:

$$\tan\beta = \frac{P}{c} \quad (10)$$

La precisa conoscenza della geometria che lega il laser alla camera consente, con l'impiego dei teoremi geometrici di Talete, di determinare la posizione del punto dell'oggetto rilevato; in particolare la profondità z come funzione degli angoli α , β e della base nota, vale:

$$z = \frac{b}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} \quad (11)$$

A parità di angolo di proiezione α , la differenza di profondità viene rilevata, all'atto della lettura sul sensore di posizione, con una correzione $\Delta\beta$ sul valore dell'angolo β .

All'interno di questa categoria si trovano strumenti molto differenti tra loro, che possono essere distinti considerando le diverse tipologie di laser e di fotodiodi ricevitori che utilizzano.

Ad esempio i **sensori a lama di luce laser** (Figura 37) usano una lama di luce generata da un laser riflesso da uno specchietto rotante o da una lente cilindrica. La lama di luce proiettata su una superficie piana produce un segmento luminoso, mentre in generale si deforma diversamente su superfici complesse.

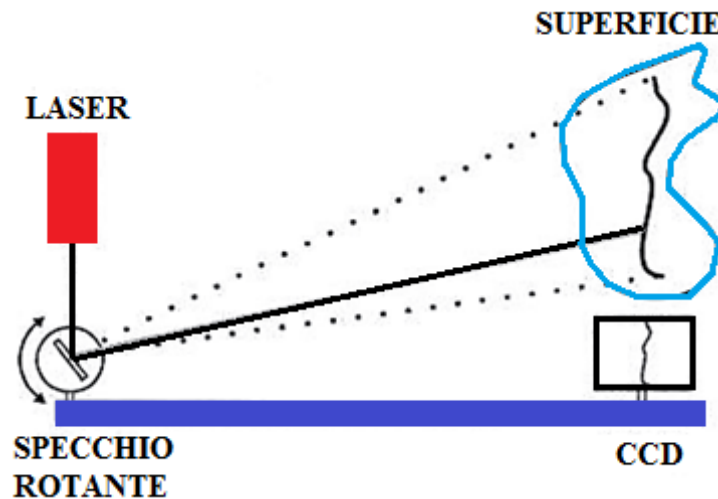


Figura 37: Schema di funzionamento di un sensore a lama di luce.

Mentre nel caso precedente le linee luminose sono prodotte in serie da una lama di luce laser che, muovendosi orizzontalmente, arriva a coprire tutta la superficie orientata verso il sensore (scansione), con i **sensori a luce strutturata** (Figura 38), grazie ad un apposito proiettore, le lame di luce sono prodotte tutte insieme e l'immagine della superficie investita da questo *pattern* luminoso è acquisita con una camera digitale. L'immagine prodotta dal proiettore è una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere: se la proiezione avviene su un piano, l'immagine vista dalla telecamera è quindi una sequenza di strisce mentre, se l'andamento della zona su cui proietta non è piana, queste tendono a distorcersi diversamente a seconda della forma della superficie sottostante.

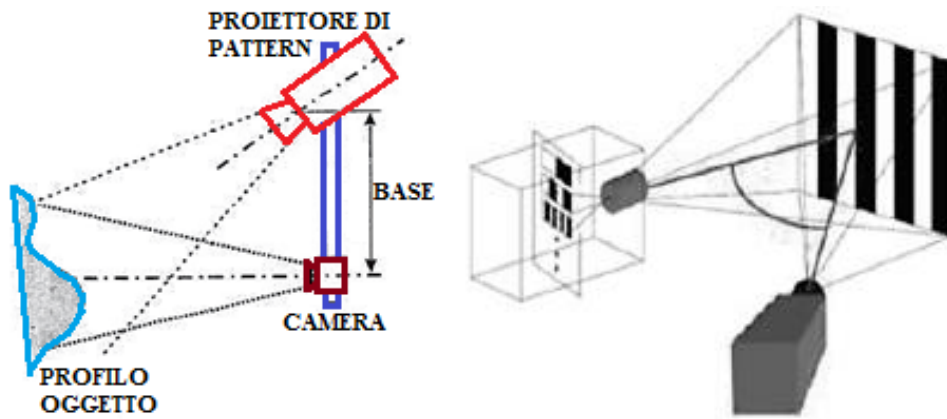


Figura 38: Schema di funzionamento d un sensore a luce strutturata.

3.5 ACCURATEZZA

Quando si parla di accuratezza di un sistema laser a scansione è necessario parlare di ripetibilità, in quanto la valutazione dell'accuratezza non può prescindere dalla constatazione che uno strumento di questo tipo rileva l'oggetto per punti singoli, ma nell'unione di più scansioni difficilmente si può ottenere più volte la misura del medesimo punto. Ciò che si ottiene è quindi una ridondanza nella misura di una superficie, ma non nella misura del singolo punto. Per questo motivo ogni punto ha solo un valore di precisione determinato dalla propagazione degli errori di misura dell'angolo, della distanza e di altri parametri che influenzano la singola misura.

I costruttori di laser scanner forniscono delle specifiche di accuratezza che non sono tra loro confrontabili, poiché vengono riferite ai propri test di laboratorio. Per questo motivo è molto difficile fondare la scelta di uno strumento su questo parametro.

È importante sottolineare come, nonostante siano sempre di più le applicazioni di questi sistemi, non esista ancora una ben precisa standardizzazione delle procedure che determinino in modo univoco e confrontabile le caratteristiche dei sistemi in commercio per i vari campi utilizzo.

Ad esempio la risoluzione d'acquisizione è determinante nella valutazione della precisione dello strumento, poiché fornisce informazioni maggiori rispetto alla dimensione dell'impronta del raggio laser e della sua divergenza. A scopo

esemplificativo si riportano i risultati di un test condotto dall'Institute for Spatial Information and Surveying Technology di Mainz (Germania) in cui vengono confrontati diversi strumenti utilizzando un unico target di riferimento, che è visibile in Figura 39. Gli strumenti sono stati posizionati a 6 metri e a 22 metri dal target e in Figura 40 sono visibili i risultati ottenuti dagli esperimenti (a sinistra una sezione della nuvola, a destra i punti rilevati sul piano posteriore del target).

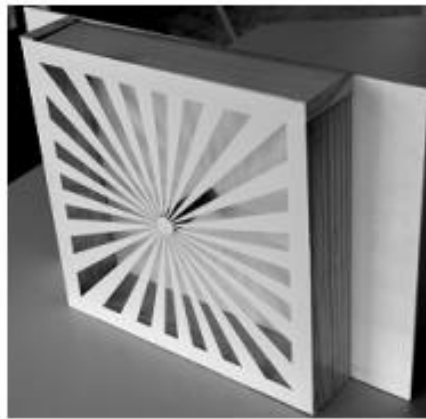


Figura 39: Obiettivo con scanalature di diversa larghezza per i test di risoluzione (Boheler e Marbs; 2006).

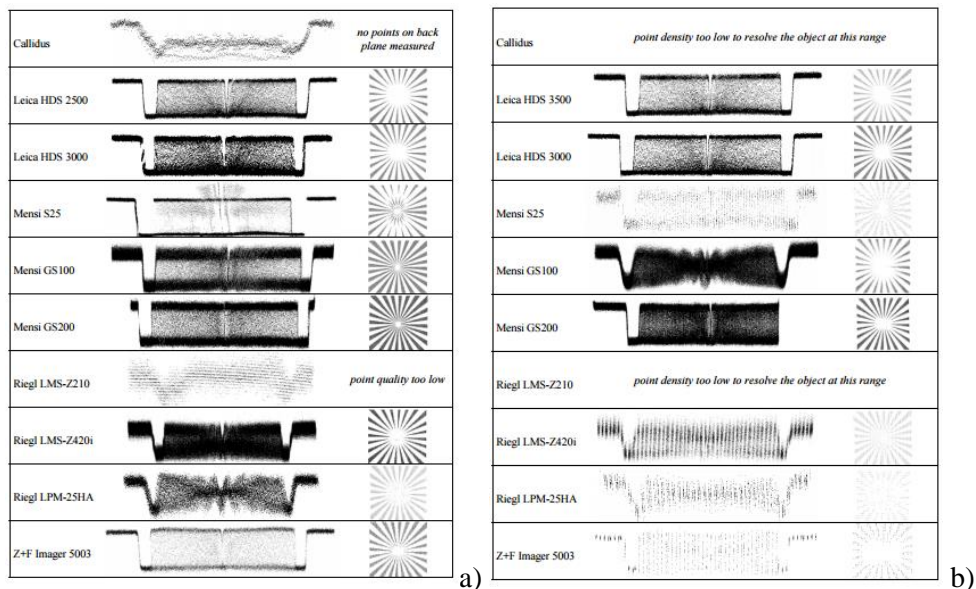


Figura 40: Risultati del test ottenuti utilizzando lo stesso target a 6 m (a) e a 22 m (b). A sinistra viene mostrata la sezione trasversale della nuvola dei punti mentre a destra i punti rilevati sul piano posteriore del target (Boheler e Marbs; 2006).

Un altro risultato interessante, evidenziato dall'Istituto di Mainz durante i propri test, è l'effetto del laser sugli spigoli (Figura 41). Questo problema può causare errori il cui ordine di grandezza varia dal millimetro a svariati decimetri ed è inevitabile, a meno che la dimensione dell'impronta del laser non venga settata sulla dimensione del punto da rilevare.

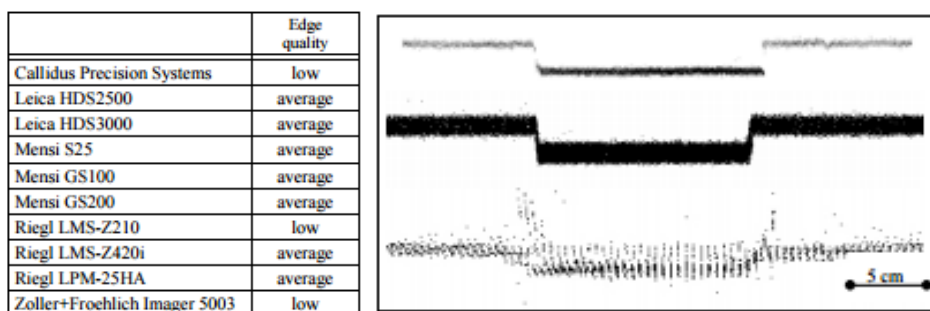


Figura 41: Test del laser sugli spigoli (Boheler e Marbs; 2006).

Nell'immagine di destra sono illustrati dei tipici esempi di qualità dello spigolo (in alto *high quality*, non raggiunto da alcuno scanner, al centro *average quality*, in basso *low*), mentre a sinistra sono riportati i risultati ottenuti per differenti sistemi.

I sistemi laser scanner dipendono dal segnale riflesso dalla superficie dell'oggetto all'unità ricevente nel caso siano distanziometrici, oppure alla camera nel caso di scanner triangolatori. In entrambi i casi l'intensità del segnale riflesso è influenzata da tanti fattori (distanza, condizioni atmosferiche, angolo di incidenza del raggio), ma anche dalla capacità riflessiva dell'oggetto. Infatti le superfici bianche producono una forte riflessione, mentre le superfici nere riflettono debolmente il raggio; l'effetto delle superfici colorate dipende fortemente dalle caratteristiche del laser, mentre le superfici lucide sono di solito difficili da rilevare. È stato osservato che superfici costituite da materiali con differente riflettività causano errori sistematici nella distanza. Per alcuni materiali questi errori possono raggiungere valori molto superiori alla deviazione standard della singola misura, per questo motivo sono stati costruiti scanner dotati di dispositivi di apertura regolabili, che presentano solamente errori nei primi punti scannerizzati: dopo che il laser ha raggiunto un'area con riflettività molto diversa dalla precedente, viene applicata in modo automatico una correzione nella misura della distanza, raggiungibile solo dopo che alcune misure sono già state effettuate. Per oggetti

costituiti da materiali differenti o dotati di colorazione diversa, l'operatore deve aspettarsi errori consistenti.

Anche le condizioni ambientali possono modificare la precisione di un rilievo. Infatti ogni scanner funziona correttamente solo in un certo range di temperatura ed anche all'interno di questo intervallo si possono osservare errori, soprattutto nella misura della distanza. Inoltre è necessario considerare che la temperatura interna allo scanner è sicuramente molto superiore a quella ambientale, sia per effetto della radiazione del sole sia per il calore che lo strumento sviluppa al suo interno.

Per quanto riguarda le condizioni atmosferiche è stato rilevato che finché vengono misurate distanze brevi, la propagazione del laser non risente dei cambiamenti di pressione e temperatura, mentre un effetto simile a quello causato dagli spigoli viene rilevato in presenza di pulviscolo o vapore.

3.6 SCELTA DELLO STRUMENTO IN BASE ALLE ESIGENZE

La scelta dello strumento deve essere effettuata in base alle esigenze specifiche di utilizzo sulla base di molteplici caratteristiche (Rinaudo; 2003):

- **Accuratezza:** è l'aspetto fondamentale in quanto si presenta come fattore determinante nel caso di rilievo architettonico o industriale dove è necessario visualizzare anche i piccoli dettagli. La quantità globale nell'acquisizione della nuvola di punti deriva dalla combinazione delle accuratèzze ottenute nella misura delle singole caratteristiche fisico-geometriche, ed è influenzata inoltre da caratteristiche intrinseche dell'oggetto rilevato e dalle condizioni ambientali. La stessa accuratezza può variare da strumento a strumento a causa delle differenze nell'eseguire la calibrazione iniziale in fase di produzione. Le caratteristiche fisico-meccaniche che concorrono al raggiungimento delle accuratèzze finali possono essere riassunte nelle seguenti:

- Accuratezza angolare: l'impulso viene direzionato sull'oggetto mediante la rotazione di prismi, la conoscenza degli angoli di rotazione nelle due direzioni, orizzontale e verticale, associata alla misura di range, permette di risalire alla posizione del punto nello spazio. Ogni deviazione angolare corrisponderà ad un errore di posizionamento: il punto, nel caso dei ranging scanner, risulterà essere appartenente alla sfera di raggio pari alla distanza oggetto-ricevitore, ma si troverà in un punto della superficie non corrispondente a quello reale.
- Accuratezza nella misura delle distanze: i ranging scanner misurano la distanza oggetto-ricevitore mediante il principio del TOF (tempo di volo) oppure mediante la differenza di fase. In questo tipo di scanner l'accuratezza varia in modo lineare rispetto alla distanza e con valori che dipendono dalla tipologia del laser e si rimanda per queste alle accuratezze fornite dai costruttori in base al range di acquisizione di ciascun laser scanner. Per i scanner triangolatori l'accuratezza diminuisce, invece, con il quadrato della distanza scanner-oggetto. Si ha quindi un andamento di tipo parabolico, con il quale è possibile esprimere l'andamento accuratezza-distanza. È utile osservare inoltre che la curvatura della parabola risulta crescere al diminuire della base di triangolazione. Base che, per ragioni pratico-costruttive, deve comunque restare contenuta in poche decine di centimetri.
- Risoluzione: questa può essere definita come la sua capacità di rilevare e rappresentare oggetti di dimensioni minime, ovvero la densità massima della nuvola di punti. Tecnicamente sono due le caratteristiche che concorrono alla determinazione della risoluzione:
 - Il minimo incremento angolare possibile degli organi di direzionamento (specchi, prismi, parti meccaniche);
 - Le dimensioni dello spot laser.

Un ridotto passo angolare permette di contenere le distanze tra i punti della nuvola e le dimensioni contenute dello spot permettono di determinare con

minore ambiguità il suo centro. La risoluzione ottenibile è uno dei fattori principali che determinano la scelta di utilizzo di uno strumento.

- Velocità di acquisizione: è un fattore rilevante per quanto riguarda la produttività del rilevamento. La durata di ogni singola scansione infatti può durare da alcuni secondi ad alcune decine di minuti. Questo dipende dal campo visivo di acquisizione, dal passo angolare, dal principio di misura del range (tempo di volo, differenza di fase, triangolazione), dalla distanza dell'oggetto, dalla velocità dei sistemi meccanico-ottici di puntamento e deflessione.
- Range di misura: è la distanza massima a cui il sensore può effettuare la misura di distanza e gioca un ruolo fondamentale nella scelta del tipo di strumento da utilizzare. Le portate dei laser in commercio vanno da alcune decine di centimetri ad alcune centinaia di metri. In tutti i casi all'aumentare della portata corrisponde una diminuzione della risoluzione d'acquisizione, quindi per scansioni a lunga distanza (oltre al centinaio di metri), si hanno risoluzioni centimetriche o decimetriche. Il valore massimo di portata raggiungibile dipende dalle caratteristiche del segnale emesso, dalla direzione con cui il raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto, ma soprattutto dalle caratteristiche di riflettività della superficie. Materiali con elevato potere radio-assorbente e superfici molto inclinate riducono l'intensità del segnale di ritorno allo strumento, limitandone la portata.
- Caratteristiche del segnale laser: queste possono subire disturbi ed interferenza in presenza di sorgenti luminose artificiali, ad esempio la luce solare ed altre radiazioni luminose prodotte dal riflesso di oggetti vicini, oppure condizioni particolari della superficie colpita. Le principali condizioni che possono influire sono: caratteristiche di riflettività del materiale (materiali con elevate capacità radio-assorbenti o materiali che vengono attraversati dal segnale luminoso, limitano le misure di range), condizioni di umidità della superficie (un elevato grado di umidità nell'atmosfera causa una forte dispersione del segnale con la conseguenza di riduzione di intensità), costante dielettrica del materiale (materiali con caratteristiche di assorbimento in alcune lunghezze d'onda

possono risultare di difficile misurabilità con strumenti laser che lavorano in tali lunghezze d'onda).

- Campo visivo: in commercio esistono tipologie di scanner che dal punto di vista del campo visivo di acquisizione possono essere raggruppate in tre categorie:
 - I *Camera Scanner* (Figura 42): hanno un limitato campo visivo, paragonabile a quanto accade in una fotocamera, l'intervallo angolare di scansione è limitato, sia sul piano orizzontale che verticale. Questo tipo di scanner è pratico per utilizzi legati al rilevamento ambientale.



Figura 42: Camera Scanner (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).

- I *Panorama Scanner* (Figura 43): hanno un campo visivo quasi sferico, limitato unicamente alla base dello strumento. La quasi totale copertura del campo visivo fa sì che questo tipo si presti molto bene alla scansione di edifici interni.



Figura 43: Panorama Scanner (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).

- *Scanner a soluzione intermedia* (Figura 44): questi tipi di scanner possono compiere rotazioni complete solamente attorno ad uno degli

assi. La rotazione attorno al secondo asse è invece limitata entro i $60^\circ \div 70^\circ$.

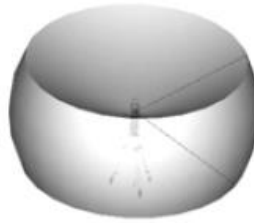


Figura 44: Scanner intermedio (Sgrenzaroli e Vassena; 2007).

- Possibilità di integrare fotocamere digitali: l'acquisizione delle prese fotografiche, necessarie per la realizzazione del modello mappato con la texture, può avvenire in tre modi differenti. La fotocamera infatti può essere interna allo scanner, esterna ma integrata al sistema laser oppure può essere una fotocamera esterna utilizzata direttamente dall'operatore. Nel caso in cui l'apparecchiatura possieda una fotocamera intera l'immagine digitale viene acquisita dal sensore CCD interno allo strumento contemporaneamente alla scansione. Generalmente in questo caso, l'immagine acquisita presenta una qualità piuttosto bassa, a causa del limite proprio dell'apparecchiatura fotografica. Un'altra soluzione adottata è quella invece di montare solidamente una fotocamera alla testa dello scanner. Di questa fotocamera sono noti i parametri interni, la posizione, la distanza focale mentre il puntamento viene controllato dallo stesso software di interfaccia dello strumento.
- Facilità di trasporto: un altro fattore determinante è la praticità e la semplicità di trasporto nel caso in cui si debbano realizzare scansioni di zone difficilmente accessibili con mezzi di trasporto (Figura 45). Spesso è proprio l'ambiente nel quale si trova il soggetto di interesse che vincola in modo sostanziale le acquisizioni. È necessario capire quali sono quelle zone in cui è possibile posizionare il sensore e se, una volta posto in stazione, il sensore verrà disturbato durante le fasi di acquisizione dal passaggio di automezzi o (peggio) di persone.



Figura 45: Esempio di ambiente poco favorevole all'acquisizione (Bornaz; 2006).

Le principali caratteristiche di cui tener conto sono:

- Peso e dimensioni dello strumento;
- Resistenza ad urti e vibrazioni che possono verificarsi durante il trasporto;
- Software di acquisizione ed archiviazione dati: l'utilizzo dello strumento necessita di un'interfaccia software installata su un computer. La sua qualità si può valutare considerandone le caratteristiche d'intuitività dell'interfaccia grafica e della scelta delle funzioni, nonché dalla serie di controlli che permette di effettuare sull'hardware:
 - Possibilità di avere una preview delle scansioni;
 - Possibilità di avere una stima del tempo di scansione;
 - Possibilità di poter lavorare contemporaneamente su finestre di presa a differente risoluzione;
 - Possibilità di acquisizione automatica dei target.

Alcune delle caratteristiche principali dei modelli di laser scanner terrestre (Figura 46), sono elencate in Tabella 2.



Figura 46: Alcuni modelli di Laser Scanner presenti in commercio: RIEGL 420i con fotocamera montata sul laser a tempo di volo (a), Trimble GX 3D Scanner (b), Faro LS 420 (c), Z+F Imager 5006 (d), Leica Scan Station 2 (e), Topcon GLS 1000 (f), Optech ILRIS-3D (f) (modificata da Sgrenzaroli e Vassena; 2007).

PRODUTTORE	MODELLO	TIPO	RANGE [m]	VELOCITA' MAX [punti/sec]	CAMPO VISIVO [gradi]
Zoller+Frohlic h GbH	3D IMAGER 5006	Diff. fase	79	500000	360°x310°
	3D IMAGER 5003	Diff. fase	25.2/53.5	625000/500000	360°x310°
Leica Geosystem	HDS 6000	Diff. fase	79	500000	360°x310°
	HDS 4500	Diff. fase	25	500000	360°x310°
	Scan Station	Impulsi	134/300	50000	360°x270°
	HDS 3000	Impulsi	100	1800	360°x270°
	HDS 2500	Impulsi	100	1000	40°x40°

Riegl LMS	LPM-321	Impulsi	500/6000	10/1000	150°x360°
	LMS-Z210ii	Impulsi	200/650	8000/10000	360°x80°
	LMS-Z390i	Impulsi	140/400	8000/10000	360°x80°
	LMS-Z420i	Impulsi	350/1000	8000/10000	360°x80°
Mensi	S25	Triang.	25	100	320°x46°
	S10	Triang.	10	100	320°x46°
	GS 200	Impulsi	350	5000	360°x60°
	GS 100	Impulsi	150	3000	360°x60°
Trimble	GX-3D	Impulsi	350	5000	360°x60°
	GS 200 3D	Impulsi	350	5000	360°x60°
Opetech	ILRIS-3D	Impulsi	350/1500	2500	40°x40°
Faro	LS 420	Diff. fase	20	120000	360°x320°
	LS 840	Diff. fase	40	120000	360°x320°
	LS 880	Diff. fase	80	120000	360°x320°

Tabella 2: Caratteristiche di alcuni laser scanner in commercio (modificata da Sgrenzaroli e Vassena; 2007).

3.7 TECNICHE DI RILEVAMENTO

Prima di approcciarsi ad un rilievo con laser scanner è consigliato, come per qualunque tipo di rilevamento, fare a monte un progetto di rilievo, nel quale si decidono le strategie, come ad esempio le posizioni delle stazioni di rilievo, il tipo di strumento da utilizzare, i settaggi dello strumento migliori per quella situazione specifica.

In questa fase progettuale è importante tenere conto di vari aspetti:

- Tipo di laser utilizzato (precisione, portata e campo di acquisizione)
- Geometria del soggetto da rilevare: quando si parla di geometria di un oggetto bisogna obbligatoriamente legare questo concetto al concetto di scala. A parità di altre condizioni (passo di scansione, precisione) se l'acquisizione è effettuata da più vicino, maggiore è il numero di punti acquisito sulla stessa porzione di oggetto. Naturalmente la precisione con cui è possibile misurare la posizione di ogni punto non cambia, a meno di differenze trascurabili, se cambia la distanza di acquisizione, perché essa dipende dal tipo di laser utilizzato. Ciò che invece cambia è la capacità di acquisire, da parte del sensore, le piccole discontinuità presenti sull'oggetto. Se i punti acquisiti dal laser si trovano mediamente una distanza relativamente più piccola della dimensione delle discontinuità, queste saranno visibili nel modello tridimensionale, mentre, se i punti acquisiti distano tra loro di un'entità che è superiore alla dimensione delle discontinuità presenti sull'oggetto, queste non saranno visibili nel modello 3D acquisito. Facile intuire come, a seconda del tipo di dettaglio che si vuole acquisire, sia necessario progettare il passo di scansione e la distanza di acquisizione per ogni posizione di rilievo (Figura 47).

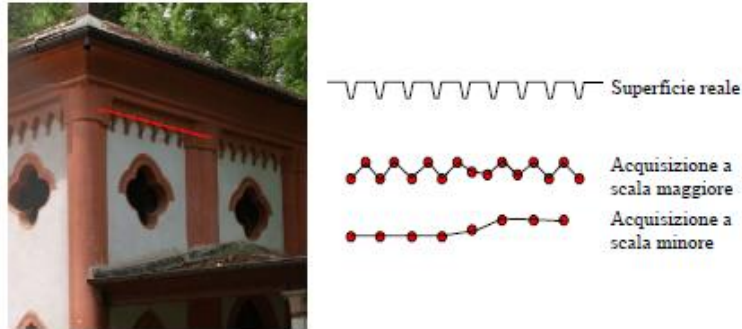


Figura 47: Esempio di acquisizioni (a parità di altre condizioni) effettuate a distanze di presa differenti (concetto di scala del rilievo) (Bornaz; 2006).

- Dimensioni dell'oggetto da rilevare: nel caso di un oggetto avente dimensioni ridotte una scansione può essere sufficiente a descrivere l'oggetto nella sua interezza. Questo non accade se l'oggetto che si vuole rilevare presenta dimensioni elevate. In questo caso è necessario effettuare più scansioni da punti di vista differenti dello stesso oggetto. Naturalmente ogni scansione effettuata è espressa in un proprio sistema di riferimento locale. Nel momento in cui si decide di effettuare più di una scansione bisogna quindi prevedere a priori il metodo che si intende utilizzare nelle fasi di allineamento di due scansioni adiacenti e nell'eventuale successiva triangolazione nel caso di una serie di scansioni. Per l'allineamento di scansioni esistono oggi in bibliografia diverse metodologie. Uno tra i metodi più utilizzati oggi nel campo topografico è quello di posizionare alcuni adesivi riflettenti (marker) o entità geometriche di allineamento (ad es. sfere) nella zone di ricoprimento tra le due scansioni adiacenti. Questi punti sono facilmente riconoscibili all'interno delle nuvole di punti e permettono quindi l'allineamento automatico di due scansioni. Naturalmente il numero di punti di legame (marker), la loro posizione e la loro dimensione deve essere stabilita a priori in funzione di dove verranno effettuate le due acquisizioni ed in funzione dell'oggetto rilevato.
- Ambiente nel quale si trova l'oggetto: ultimo aspetto da considerare nel progetto di acquisizione laser è l'ambiente nel quale si prevede di operare. Spesso è proprio l'ambiente nel quale si trova il soggetto di interesse che vincola in modo sostanziale le acquisizioni. Uno degli aspetti di maggiore importanza è il

controllo in tempo reale dei dati. Se il controllo dei dati viene effettuato direttamente sul territorio è possibile infatti controllare che tutti gli oggetti che ci si era prefissati di acquisire siano stati digitalizzati. In caso contrario è possibile integrare direttamente i dati senza bisogno di tornare sul luogo del rilevamento in un secondo tempo. Questa possibilità in genere è fornita direttamente dal software di acquisizione e gestione dello strumento.

Di fondamentale importanza è decidere la sistemazione dello strumento rispetto all'oggetto, facendo attenzione ai coni d'ombra. Se davanti a una facciata vi è un ostacolo e la parte retrostante non può essere misurata, si è dunque costretti a spostarsi ed effettuare una seconda ripresa. Le due scansioni permetteranno di avere una nube completa priva di ombre. Il vantaggio dell'acquisizione di una grande mole di dati mostra però, in fase di elaborazione dei dati LIDAR, i due problemi principali con cui si deve fare i conti in fase di restituzione:

- La gestione di una grande mole di dati elaborabili solo con calcolatori di fascia medio-alta e con software dedicati;
- Il riconoscimento delle linee di discontinuità che statisticamente non saranno mai acquisite direttamente ma dovranno essere sempre ricostruite a priori.

Una volta effettuate queste operazioni preliminari, le fasi vere e proprie di rilievo con il laser scanner si distinguono in:

- Fase di acquisizione dei dati (scansione);
- Fase di processamento dei dati;
- Fase di elaborazione dei dati.

Lo scanner una volta montato su un treppiede dotato di livella, viene collegato alle batterie e programmato con un computer esterno. I parametri da impostare sono: la risoluzione, che permette di stabilire quanti punti catturare in una scansione; la velocità di scansione, che dipende dalla risoluzione in maniera inversamente proporzionale; la precisione, che dipende dalla risoluzione in maniera direttamente proporzionale: maggiore è il numero di punti acquisiti, migliore è il dettaglio della scansione.

Impostati i parametri, lo scanner inizia ad emettere un raggio laser che colpisce l'oggetto producendo una nuvola di punti relativa alle superfici colpite dal raggio. Alla fine di ogni scansione, che dura in media dai 15 ai 20 minuti, a seconda della risoluzione impostata, i dati vengono registrati o sul pc interno di cui è dotato lo scanner o su una scheda di memoria.

Queste scansioni possono poi essere processate ed unificate attraverso dei software che di solito vengono forniti assieme allo strumento. Il risultato finale che deriva dall'unione delle scansioni è una nuvola di punti tridimensionale. Per ogni punto della nuvola, il rilievo tridimensionale trasmette le tre coordinate del punto rilevato (x, y, z) e il valore della riflettanza, cioè la capacità dei corpi di riflettere il raggio laser, che cambia a seconda del materiale. La riflettanza indica per ciascun punto di una superficie di materiale opaco, colpito da un raggio luminoso, il fattore di risposta. Al valore 0 corrisponde riflettanza nulla: si riferisce a quei corpi che assorbono completamente il raggio laser senza rifletterlo (es. i corpi neri), mentre il valore 255 sta ad indicare riflettanza massima.

3.8 TRATTAMENTO DEI DATI

L'interesse di chi utilizza un sensore laser scanner è di ottenere uno o più prodotti del rilevamento che consentano di estrarre, nel modo più agevole possibile, una serie di informazioni riguardanti l'oggetto che è stato rilevato. Le nuvole di punti acquisite con i sensori laser sono in grado, per loro natura, di rispondere a questo tipo di esigenza solo parzialmente. Si tratta, infatti, di dati di tipo discreto e quindi difficilmente interpretabili. Per questi motivi, al fine di ottenere uno o più prodotti in grado di rispondere alle esigenze dell'utilizzatore, si rende necessario elaborare correttamente i dati acquisiti. Secondo il tipo di prodotto che si vuole ottenere dovranno essere attuate particolari procedure di trattamento ed elaborazione che, esattamente come nel caso delle acquisizioni, dovranno essere progettate a priori e controllate durante l'utilizzo. Il progetto delle fasi di elaborazione del dato laser è di fondamentale importanza in quanto è proprio a questo insieme di operazioni che si ottiene il prodotto finale.

Con trattamento dei dati laser scanner si intende l'insieme delle operazioni, mostrate in Figura 48, che consente di ottenere, a partire da una o più nuvole di punti acquisite, un prodotto finale che possa essere utile ad un utente per l'estrazione di informazioni di interesse (modello 3D a colori, immagine solida, ortofoto di precisione, ecc.).

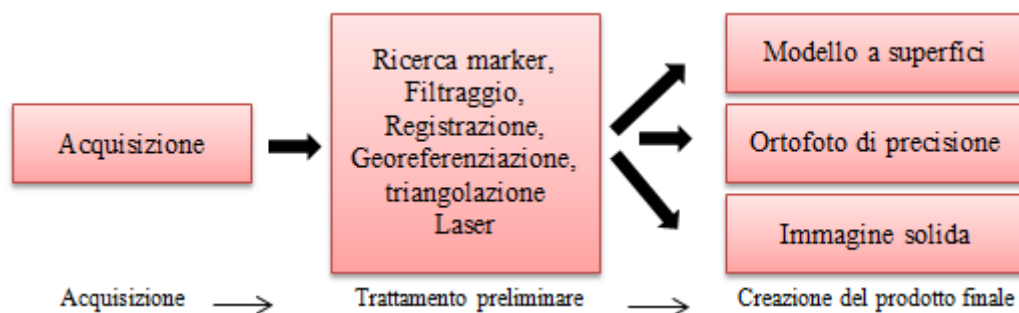


Figura 48: Procedimento di trattamento del dato laser (modificato da Bornaz; 2006).

Di seguito sono elencate alcune delle operazioni tipiche di trattamento preliminare dei dati laser:

- **Acquisizione**: consiste nell'inserimento dei dati e delle immagini nel programma;

- Calibrazione della camera (mounting): consiste nell'orientamento della camera fotografica rispetto al laser scanner così da definire il legame geometrico fra pixel acquisiti dalla fotocamera e punti rilevati con laser scanner. Questa procedura si realizza mettendo in relazione la posizione dei marker sulle immagini con la loro posizione all'interno della nuvola di punti. Il riconoscimento dei marker nella scansione è eseguito in modo automatico dal software di elaborazione in base alla riflettanza dei punti presenti, il riconoscimento automatico ovviamente comporta errori grossolani come l'identificazione di punti che in realtà non sono marker. Il collegamento fra i punti immagine e i punti scansione è affidato all'operatore che può quindi intervenire eliminando i punti erroneamente identificati come marker e scegliere su quali punti realizzare il calcolo del mounting;
- Filtraggio: operazione attraverso la quale si toglie il rumore di misura e gli errori di acquisizione.
- Georeferenziazione: si realizza mettendo in relazione coordinate dei marker, rilevate in un sistema di riferimento generale, con la nuvola di punti acquisiti mediante la scansione laser. Il software mette in relazione la posizione dei punti rilevati con la posizione dei punti all'interno della nuvola e individua i parametri di trasformazione fra i due sistemi che minimizzano gli scarti. Con tali parametri si definisce quindi la posizione di ogni punto della scansione nel nuovo sistema di riferimento;
- Colorazione della nuvola di punti per mezzo delle immagini digitali se acquisite durante le operazioni di rilievo;
- Registrazione dei punti: ogni punto rilevato mediante scansione è definito attraverso le sue tre coordinate, tre numeri che ne definiscono il colore (componenti RGB) e il valore di riflettanza. Essa è rappresentata dal rapporto tra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente, è una grandezza adimensionale. Con la registrazione oltre a memorizzare queste informazioni si uniscono le diverse scansioni.

Da queste operazioni preliminari si ottiene una nuvola di punti colorata e georeferenziata. A questo punto si può modificare la nuvola di punti con operazioni di modellazione 3D, come per esempio la segmentazione, che consiste nella separazione della nuvola colorata in superfici omogenee (piani, cilindri, con); creazione di superfici (*meshing*); la modellazione, che consiste nell'utilizzo delle superfici e della segmentazione per la realizzazione di un modello 3D.

Il prodotto finale può essere, in base agli scopi prefissati, un modello 3D, un'immagine digitale, un'immagine solida, un'ortofoto solida di precisione, ecc.

4. STAMPANTI 3D

La *Stampa 3D* rappresenta la naturale evoluzione della *Stampa 2D* e permette di avere una riproduzione reale di un modello 3D realizzato con un software di modellazione tridimensionale. Inoltre essa è considerata una forma di *produzione additiva* mediante cui vengono creati oggetti tridimensionali da strati di materiali successivi. La produzione additiva consiste in un insieme di tecniche di produzione di oggetti con le quali il modello viene creato andando ad aggregare materiale strato dopo strato. Questi processi tecnologici non sono ancora maturi, basti pensare a tutte le nuove tecniche che nascono ogni anno ed ai miglioramenti delle tecniche esistenti.

Il lancio delle stampanti 3D agli inizi del XXI secolo ha fornito un'alternativa pratica ed economica alle macchine di modellazione industriali. I primi sistemi di stampaggio tridimensionale furono progettati alla fine degli anni Sessanta con l'obiettivo di aiutare le aziende nello sviluppo di prototipi che venivano impiegati nelle verifiche di stile, prove funzionali e di montaggio. Nello scenario attuale, questo sistema, chiamato prototipazione rapida si è ramificato. Infatti non viene solamente utilizzato per la realizzazioni di prototipi ma anche nella realizzazione di prodotti finiti.

Con le stesse dimensioni di una fotocopiatrice, queste stampanti possono creare facilmente e velocemente oggetti tridimensionali, specialmente modelli, di vari formati, dai più semplici ai più complessi, anche a colori. Sono gestite da un normale computer che usa uno software specifico di modellazione 3D e sono molto efficienti grazie alla possibilità di riciclare i materiali di scarto. Infatti da qualche anno a questa parte hanno raggiunto anche gli utenti privati.

L'inventore della stampa 3D è Charles "Chuck" Hull (Figura 49) al quale era suscitata l'idea di costruire una macchina che stampava oggetti. Erano gli inizi degli anni ottanta e il dirigente di Chuck non diede molto peso a quelle parole all'epoca. Prima tentò di scoraggiarlo ma alla fine accettò un compromesso, l'ingegnere avrebbe lavorato di giorno alle lampade dell'azienda e di notte, anche nei weekend se voleva, si poteva anche dedicare alla sua stampante da "fantascienza" (Il fatto quotidiano website).



Figura 49: Charles Chuck Hull.

L'idea di Chuck Hull era quella di realizzare oggetti con strati di plastica, incisi da un blocco iniziale e fissati con le lampade a ultravioletti, ma gli mancava la macchina per farlo. L'obiettivo fondamentale era quello di creare un *codice*, cioè un programma che avrebbe guidato la fresa nel taglio. Ci sono voluti mesi di tentativi, molti dei quali andarono a vuoto. Alla fine i macchinari occupavano un intero magazzino. Quella era la prima stampante 3D della storia.

Questa prima tecnica di stampa 3D a quel tempo venne chiamata **stereolitografia** e i primi prototipi vennero messi in commercio nel 1986, dalla *3D Systems* fondata da Hull in California. Hull sviluppò anche il formato file .stl per i software CAD (*Computer Aided Design*) poiché ogni macchina ha bisogno del progetto di input per funzionare.

La stereolitografia però è limitata dal materiale che può lavorare perché essenzialmente si tratta di materiale plastico, quindi l'uso industriale degli oggetti prodotti con tale tecnica non poteva andare oltre che la produzione di prototipi funzionali o di modelli usati per creare degli stampi. In realtà tutto ciò potrebbe sembrare riduttivo ma procura comunque vantaggi nel mondo industriale, infatti, la produzione additiva riduce i tempi di realizzazione degli oggetti perché non c'è bisogno di predisporre attrezzature di sostegno e permette di costruire forme con geometrie complesse.

Tuttavia nel corso degli anni si sono sviluppate tecniche con le quali si è in grado di lavorare materiali tipo i metalli, ossia *selective laser melting*, *electro beam melting* e *multi jet printing* (Close up engineering website).

La stampa 3D consente di sviluppare prodotti non più vincolati da elementi di complessità, permettendo di liberare lo spirito creativo ed innovativo dei designer e dei progettisti. La complessità del prodotto, ancora presente, ma legata solamente ad una complessità progettuale piuttosto che produttiva, diventa quindi un fattore marginale dello sviluppo del prodotto. Questo è uno degli aspetti più rivoluzionari rispetto alle logiche tradizionali in cui lo sviluppo del prodotto era limitato da vincoli tecnici e produttivi stringenti. Con la stampa 3D si assiste ad uno spostamento delle competenze e della complessità dalla produzione alla progettazione. Qualsiasi persona abbia la capacità di utilizzare un programma CAD per la creazione di modelli 3D può stampare un proprio disegno, ottenendo in questo modo l'oggetto fisico senza conoscere il funzionamento della stampante e senza necessità di utilizzare macchinari produttivi.

4.1. CAMPI DI UTILIZZO

Non c'è praticamente nessun settore in cui la manipolazione di materia secondo forme prestabilite e personalizzate non appaia interessante. La stampa 3D ha toccato i primi utilizzi nell'ambito della prototipazione, settore in cui la realizzazione di miniature per progetti e plastici era stata condizionata dalla manualità. Da qualche anno invece ogni grossa azienda che si rispetti dispone di una costosa stampante 3D e di un addetto alla prototipazione che, tramite svariati progetti CAD, può stampare direttamente tutti i componenti dei plastici senza particolari sforzi. Tale concetto sta prendendo ormai piede ovunque, e infatti il settore dell'industria è in netto fermento. Stampare componenti *ad hoc* è diventata una abitudine in campi come la produzione industriale, la progettazione, l'ingegneria, l'architettura, il design, l'abbigliamento, l'oggettistica, la medicina, la robotica e l'alimentazione (Ridible website).

Questo percorso di adattamento della stampa 3D ai vari ambiti aziendali e il suo costante avvicinamento al consumatore finale è osservabile nei grafici sull'adozione di queste tecnologie nei vari settori, avvenuta con cadenza decennale. Attorno agli anni Novanta è stata usata per velocizzare i processi di prototipazione rapida e per la creazione di modelli; all'inizio del nuovo millennio ha fatto il suo ingresso nella "digital manufacture", ossia lo sviluppo di oggetti tramite modelli 3D successivamente stampati;

infine, alcuni anni fa si è sviluppata anche all'interno delle case degli hobbisti, ponendo le basi per una fabbricazione personale degli oggetti (Figura 50).

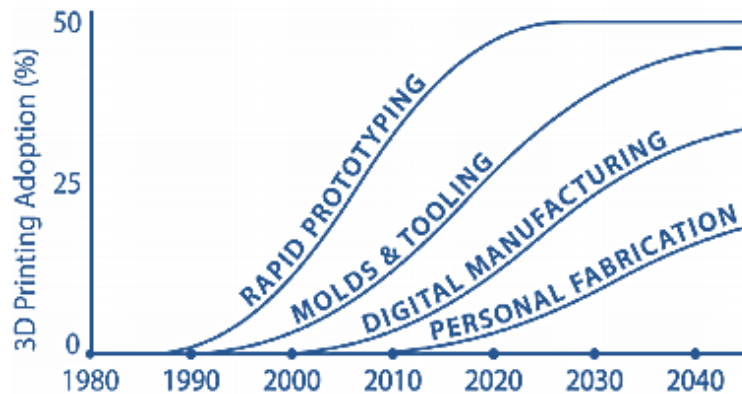


Figura 50: Adozione delle tecnologie di stampa 3D (Barnatt; 2013).

Nell'ingegneria la cosa ha preso piede fin da subito. Avere la possibilità di produrre velocemente prototipi di progetti da lanciare su grande scala che rispettino anche le caratteristiche fisiche dei prodotti non è sicuramente un cosa da poco. Spesso e volentieri la cosa non si limita alla prototipazione: sono svariati gli studi che hanno sostituito la valanga di sofisticati macchinari con stampanti 3D adatte alla produzione massiccia di oggetti.

In questo campo è stato di notevole interesse la realizzazione della stampante 3D più grande al mondo (Figura 51) di circa 12 metri di altezza che ha lo scopo di realizzare case di argilla. La WASP (*World's Advanced Saving Project*), azienda ravennate leader nel mondo della stampa 3D, prevede che entro il 2030 ci potrà essere una rapida crescita della richiesta di alloggi a prezzi accessibili ed adeguati per oltre 4 miliardi di persone con un reddito annuo sotto i 3000 dollari. Essa propone una visione molto più estesa rispetto a quella di una casa a costo zero, cioè propone un nuovo modello in cui tutto può essere autoprodotta grazie a soluzioni condivise e fornite dalla stampa 3D e legate alle necessità primarie quali lavoro, salute e abitazione.



Figura 51: Stampa 3D più grande al mondo (Stampa 3D forum website).

Anche il mondo dell'*architettura* ha abbracciato molto volentieri la nuova tecnologia (Figura 52). Il settore è già da moltissimi anni molto radicato sullo sviluppo di strutture tramite CAD, e se da un lato anche in questo caso la prototipazione rappresenta una parte fondamentale per la realizzazione di strutture architettonali, da un altro, sono sempre più presenti i progetti che vedono la produzione 3D come elemento attivo sul prodotto finale.

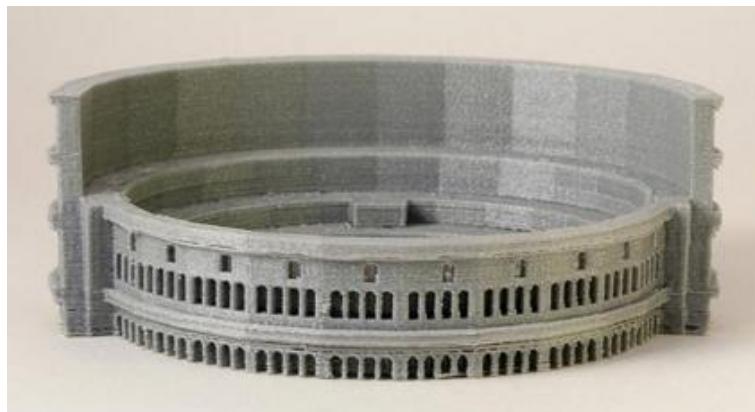


Figura 52: Stampa 3D di un modello architettonico (Maietta; 2014).

Altro settore in cui il 3D printing inizia ad acquisire importanza è la *medicina*. Qui la tecnologia è attualmente in fase di sviluppo per quanto riguarda la produzione di protesi da impiantare all'interno dell'essere umano. Queste ovviamente possono essere di qualsiasi dimensione e forma, ma costituite in biomateriali in grado di convivere all'interno dell'organismo umano senza creare alcun problema. L'impiego della nuova generazione di stampanti consente di poter creare, tramite computer, protesi più

personalizzabili in base alle minime esigenze fisiche del paziente, cosa che non è assolutamente da sottovalutare (Figura 53). La produzione delle stesse è inoltre un processo decisamente più rapido rispetto a quella classica, e il tempo, quando si tratta di salvare vite, è ovviamente più prezioso. Sebbene si parli di fantascienza, la ricerca procede anche verso la replicazione di organi prodotti mediante la medesima tecnologia.



Figura 53: Stampa 3D di una protesi a basso costo (Maietta; 2014).

Un altro settore interessato dalla tecnologia 3D è quello della moda. Uno stilista olandese, Iris van Herpen, ha sulle spalle la produzione di ben 7 collezioni di abiti da passerella. Gli abiti-scultura sono stati realizzati grazie a una stampante 3D, sperimentando già dal 2008, questa tecnica è stata mostrata al pubblico alla settimana della moda di Amsterdam (Figura 54).



Figura 54: Un top stampato in 3D (Ceppi; 2012).

Un ultimo settore che è stato interessato dalle stampanti 3D è il *consumer*, dove le applicazioni della stampante riguardano la più disparata oggettistica. Da chi realizza giocattoli per i propri figli, dai castelli componibili, alle tartarughe, alle macchine da Formula 1, bracciali, orecchini, cover per telefoni ecc. Chi ancora realizza oggettistica per la propria abitazione, come vasi per fiori o piccole sculture per abbellimento. Chi realizza utensili da cucina, come formine per i biscotti, mestoli, ganci per appendere le presine e utensili vari. Chi pensa agli animali, realizzando ciotole per il cibo e giocattoli vari. Anche dal lato consumer è necessario fare delle considerazioni. Rispetto al passato il mercato ha visto ridurre drasticamente il prezzo di acquisto delle stampanti 3D, rendendole così accessibili a un pubblico più ampio. Come avviene per ogni innovazione, deve essere valutata la reale convenienza.

Proprio per questo motivo negli anni si stanno formando alcune piattaforme internet come la *Shapeways 3D Printing Service and Marketplace* (Shapeways website) in cui, una qualsiasi persona in grado di creare modelli tridimensionali, tramite questo sito, scegliendo tra una gamma ampia di materiali, che passano da materiali plastici a quelli metallici (oro e platino compresi) per i quali viene mostrato un prezzo diverso al cm^3 in base alla scelta del materiale, ha la possibilità di stampare modelli senza dover comprare una stampante 3D. In questo modo il produttore conosce fin dal principio il costo del modellino stampato e questo gli viene spedito direttamente a casa.

4.2. LE DIVERSE TECNOLOGIE DI STAMPA 3D

Come introdotto all'inizio, la stampa 3D è una tecnologia additiva, cioè permette di realizzare oggetti tridimensionali aggiungendo materiale su altro materiale (Maietta; 2014).

Per capire il funzionamento dei processi di creazione di prodotti a strati è utile ricorrere ad un semplice esempio: un grattacielo. Per costruire un grattacielo è infatti necessario creare una base, le fondamenta, su cui verranno appoggiati i successivi “piani” del grattacielo; una volta costruito il primo piano sarà allora possibile creare il secondo, su cui verrà eretto il terzo e così via. Solo quando il piano precedente sarà completamente formato si potrà procedere alla costruzione del successivo. Allo stesso modo, lo sviluppo di un prodotto tramite le tecnologie di stampa 3D avviene per strati, chiamati *layers*. La stampante procede inizialmente alla creazione del primo strato del prodotto, depositando o fondendo il materiale di costruzione, e solo quando il primo livello è completo procede nella creazione del prodotto depositando il secondo strato per poi proseguire con i successivi. Centinaia o addirittura migliaia di *layers* di materiale, a seconda della grandezza del prodotto e della risoluzione desiderata, vengono quindi creati uno sopra l'altro fino a generare il prodotto finito.

La bontà del modello stampato dipende da due fattori essenziali, quali la risoluzione del contorno del singolo strato e il suo spessore. La precisione del contorno è importante in quanto livelli di bassa risoluzione creerebbero delle forme poco definite e, soprattutto nelle parti curve o arrotondate, il bordo risulterebbe irregolare. Lo spessore dello strato incide anch'esso sulla bontà del pezzo poiché, considerando che l'oggetto è creato da strati sovrapposti, quanto più gli strati saranno sottili, tanto più la superficie esterna del prodotto risulterà uniforme.

Per realizzare un oggetto tramite stampa 3D esiste più di una tecnica. La tecnologia regina (dovuta appunto al basso costo) è sicuramente la stampa a deposizione fusa (*Fused Deposition Modeling* - FDM). Altre tecniche di stampa sono la SLS (*Selective*

Laser Sintering), il DLP (*Digital Light Processing*), oltre che altre metodologie usate per la realizzazione di oggetti in leghe metalliche e altri materiali (Stampa 3D forum).

Di seguito verranno descritte le varie tipologie di funzionamento di stampa 3D:

- **Metodo a fusione:** FDM è una tecnologia sviluppata da *Stratasys*, azienda leader del mercato, che consiste nella deposizione del materiale strato su strato tramite un ugello (Figura 55). Il materiale, sotto forma di filamento plastico o metallico (ci sono diversi diametri i più utilizzati e reperibili in commercio sono il 3 mm e 1,7 mm), viene fatto passare all'interno di un estrusore composto dal sistema di alimentazione del materiale e dall'ugello riscaldante. L'ugello di stampa si muove in orizzontale e in profondità (assi X e Z) per permettere la stampa completa dello strato, mentre il piano di lavoro si sposta verso l'alto (asse Y) per permettere la sovrapposizione degli strati e quindi la stampa di oggetti tridimensionali. Attualmente vi sono molti materiali che supportano questa tecnica, infatti è largamente utilizzata nel mercato consumer. I più comuni sono: PLA (di derivazione organica – mais), ABS, Laywood (PLA misto a segatura di legno), PVA, HIPS, materiali gommosi come il Ninja flex. Mese dopo mese sono inserite sul mercato stampanti 3D che utilizzano proprio questa tecnica perché è quella che consente di avere il prezzo di vendita più basso. Con la diffusione sempre maggiore di queste stampanti 3D economiche, vi è un fiorire sempre maggiore di nuovi materiali adatti agli scopi più disparati. Le stampanti 3D Makerbot, Ultimaker, Sharebot, Kentstrapper e Reprap utilizzano questa tecnica. Lo strato minimo stampabile con questa tecnica si aggira (dipende dai modelli) circa sui 100 micron (0,1 mm).

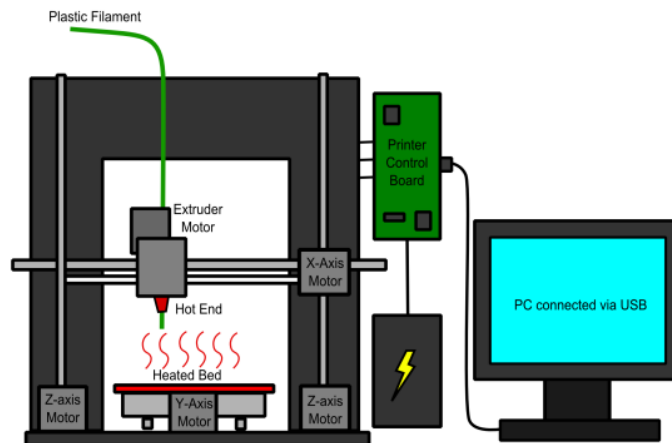


Figura 55: Processo di stampa FDM.

- **Metodi granulari:**

- SLS è una tecnologia molto più raffinata del FDM, in quanto permette la fusione del materiale sotto forma di polvere da parte di un laser che disegna le geometrie dell'oggetto (Figura 56). Inizialmente viene steso uno strato di polvere sulla superficie di lavoro. Successivamente il laser *sinterizza* (la sinterizzazione è un particolare trattamento termico che ad elevata temperatura trasforma un materiale polverulento in un materiale indivisibile) la polvere seguendo il disegno e la forma creando quindi un primo livello del prodotto finale. Una volta creato il primo strato viene abbassata la superficie di lavoro e stesa un'ulteriore quantità di polvere che viene successivamente colpita dal laser secondo la forma prevista per il secondo strato e andando così a unire il nuovo strato a quello precedente. Ovviamente, la polvere deve essere stesa su tutta la superficie stampabile per garantire la massima libertà di stampa ed è quindi intuibile che solo una piccolissima parte della polvere sarà effettivamente utilizzata per la stampa. Il prodotto finito risulterà immerso nella polvere vergine non utilizzata, che potrà però essere recuperata per creare nuovi prodotti. Il livello di precisione di questa tecnica di stampa è quasi dieci volte superiore alla tecnica FDM. Uno dei suoi limiti è il costo del materiale base, infatti si tratta di resina pura la quale di certo non costa come 1kg di ABS per la tecnica FDM. Con

questa tecnica possono essere realizzati oggetti in materiali termoplastici, leghe metalliche e ceramica.

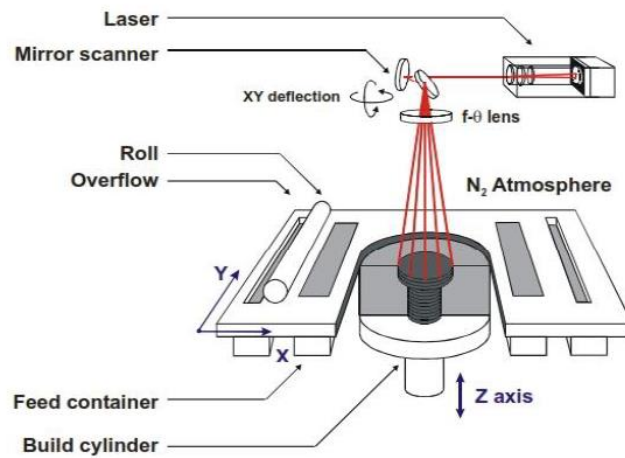


Figura 56: Processo di stampa SLS (Kruth et al.; 2008).

- DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) è praticamente uguale alla sopra citata SLS, cambia solamente il materiale di stampa, infatti si riescono a stampare metalli. Gli oggetti sono costruiti strato dopo strato tramite la fusione laser locale di polveri di metallo con una granulometria molto fine, tale da permettere la costruzione con layer fino a 20 micron. Con questa tecnica si possono realizzare oggetti in molte leghe metalliche tra cui: Acciaio, Acciaio inossidabile, Cromocobalto, Alluminio e leghe di Titanio. La tecnologia DMLS risulta estremamente innovativa e offre l'opportunità di realizzare prototipi e parti direttamente in metallo, senza bisogno dello sviluppo di attrezzature e per essere testate e utilizzate in maniera funzionale. La possibilità di sviluppare componenti con un grado di precisione elevato e un livello di dettaglio accurato consentono di produrre parti anche per il settore orafa, favorendo post-lavorazioni sui materiali sviluppati, portando ad un risparmio di tempo e ad un annullamento dei costi dello sviluppo di attrezzature.
- SLM (*Selective Laser Melting*) è una tecnica che non utilizza la sinterizzazione per la solidificazione dei granuli di polvere, ma fonde totalmente il materiale in modo selettivo, utilizzando un laser ad alta energia (Figura 57). Ciò fa sì che la polvere utilizzata per il processo

possa essere purissima e, insieme alla finissima granulometria, fornisca un materiale depositato (con l'aiuto del laser come mezzo di apporto termico) di gran lunga più compatto e omogeneo rispetto ai sinterizzati tradizionali. La sua densità arriva addirittura al 99,5% di quella del materiale base in lingotto. Ne derivano proprietà meccaniche equivalenti e anche strutture superficiali estremamente regolari e compatte, con microporosità praticamente insistente e quindi possibilità di ottenere sulla stessa superficie finiture superficiali speculari esattamente come sul metallo base. I materiali utilizzati sono le leghe di titanio, acciaio inossidabile e alluminio. Il processo consiste in: su un piano di lavoro viene steso uno strato di polvere metallica a bassa granulometria e di purezza praticamente assoluta (nessun additivo bassofondente e simili) con uno spessore di circa 30 micron. Un fascio laser di opportune caratteristiche viene guidato da un CNC sullo strato predetto e che, con un'alternanza controllata di accensioni e spegnimenti, determina la fusione di certe parti dello strato (corrispondenti ai "pieni" del futuro pezzo) lasciando invece intatta la polvere nelle zone corrispondenti alle parti cave del pezzo stesso. Completata l'operazione sul primo strato di polvere, se ne deposita un secondo e si ripete il ciclo strato dopo strato, fino alla creazione del pezzo completo. Una delle qualità migliori di questa tecnica di stampa è che le proprietà meccaniche e fisiche dell'oggetto sono praticamente identiche a quelle di un modello ottenuto per fusione tradizionale, senza le criticità (es. fragilità) tipiche dei materiali sinterizzati.

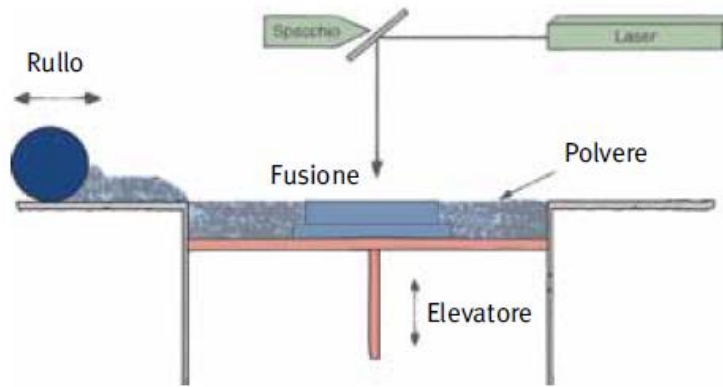


Figura 57: Processo di stampa SLM (Ceppi; 2012).

- EBM (*Electron Beam Melting*) ovvero Fusione a Fascio di Elettroni, è una tecnologia mediante la quale una sorgente di elevata energia, composta da un fascio opportunamente concentrato e accelerato di elettroni, colpisce un materiale in forma “micro granulometrica” provocandone la fusione completa (materiali intesi i metalli come titanio o alluminio). Il processo di produzione è completamente sottovuoto e permette quindi la lavorazione anche su materiali che altrimenti reagirebbero immediatamente con l’ossigeno producendo composti indesiderati. Il processo di fusione dei materiali avviene a temperature comprese tra i 700 e i 1000°C così da ottenere parti sostanzialmente prive di tensioni residue, pertanto non necessitano di trattamenti post-produzione. Questa tecnica è stata sviluppata dall’azienda svedese *Arcam* ed è particolarmente apprezzata nei settori aeronautico, aerospaziale e biomedicale. La lega con cui si possono realizzare oggetti è il Titanio in lega Ti6 Al4V o puro (Figura 58).

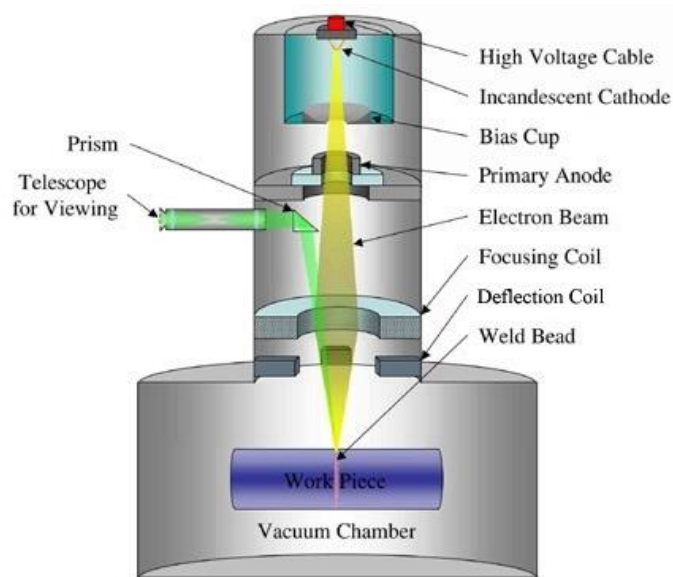


Figura 58: Processo di stampa EBM.

- **Metodo Laminato:** LOM (*Laminated Object Manufacturing*) è una tecnologia che utilizza come materiale dei laminati, che costituiscono lo strato che viene processato con sistemi di taglio tangenziale o laser per separare la sezione che interessa il modello dal materiale di scarto. Quest'ultimo a sua volta costituisce un valido materiale di supporto, che verrà rimosso a stampa finita. Apparse inizialmente attorno agli anni 90', queste stampanti impiegavano meccaniche derivate da comuni stampanti laser in bianco e nero. Attualmente alcune aziende come *Mcor Technologies Ltd* impiegano una stampa laser a colori usando la deposizione selettiva di adesivo, mentre il taglio dello strato avviene con una lama in metallo duro, e questo consente di produrre modelli in full color con una resa cromatica migliore rispetto all'uso di polveri e collante, ed una maggiore robustezza meccanica. Altre aziende offrono stampanti che utilizzano sottili laminati plastici e metallici. Con questa tecnica possono essere realizzati oggetti in carta, metallo e materiale termoplastico.

- **Metodi di polimerizzazione attraverso la luce:**
 - DLP: a seconda del tipo di luce impiegata per solidificare selettivamente il materiale, si parla di SLA, che generalmente utilizza una sorgente

laser, o di DLP, che impiega proiettori LED o LCD per polimerizzare, generalmente dal basso (Figura 59). Il fotopolimero allo stato liquido è esposto alla luce di un proiettore DLP in condizioni di luce inattinica, quindi il liquido esposto si indurisce, la piastra di costruzione si muove in alto di pochi decimi di millimetro e il polimero liquido è di nuovo esposto alla luce. Il processo si ripete finché il modello non è finito. Questa tecnologia, all'origine impiegata per realizzare stampanti professionali e industriali dai costi particolarmente elevati, vive oggi un processo di democratizzazione e promette l'avvento nel mercato di stampanti ad alta risoluzione dai prezzi popolari.

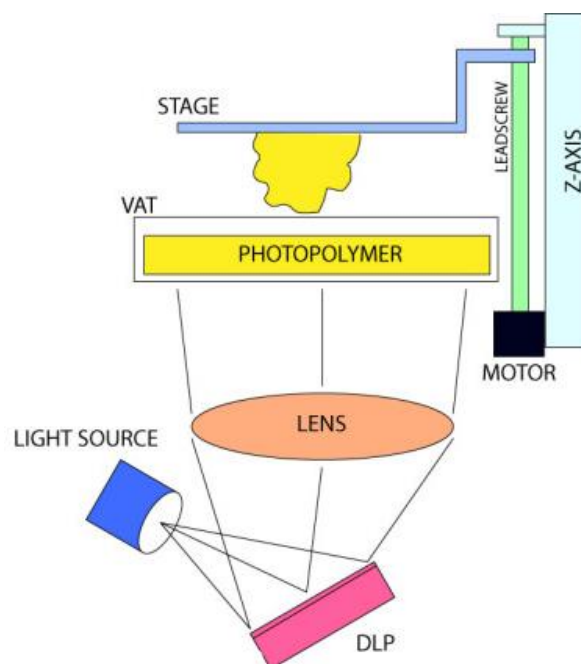


Figura 59: Processo di stampa DLP.

- SLA (*Stereolitografia*) è la tecnica brevettata da Chuck Hull nel 1986, la stereolitografia utilizza un processo di fotopolimerizzazione per solidificare una resina liquida (Figura 60). Come per la DLP, questa tecnica varia solo per il tipo di luce, in questo caso è un laser. Il processo è suddiviso in quattro fasi principali partendo dal file tridimensionale CAD: la prima fase riguarda la preparazione del file macchina che consiste nell'esecuzione dello *slicing* per ricavare le sezioni del pezzo e

nella generazione dei supporti per il sostegno del pezzo durante la fase di costruzione. Nella seconda fase partecipa la fotopolimerizzazione, cioè la fase di costruzione del prototipo sotto il controllo del calcolatore. Il fascio di una sorgente laser a gas o allo stato solido viene focalizzato sulla superficie della vasca contenente il monomero allo stato liquido. L'interazione della radiazione laser con il fotopolimero innesca una reazione chimica che ha come effetto la solidificazione di quest'ultimo. Il movimento nel piano del fascio laser consente la realizzazione della prima sezione del pezzo su di una piastra di acciaio forata, denominata elevatore. A questo punto inizia la fase di ricoprimento, al fine di avere un film di liquido sopra la sezione appena costruita. Ottenuto il corretto livellamento, il processo riprende con la costruzione di uno strato successivo, tale che aderisca stabilmente a quello sottostante. Il processo continua fino alla completa costruzione del prototipo che alla fine verrà estratto dalla vasca per mezzo dell'elevatore. I principali limiti sono determinati dalla scarsa reperibilità, potenziale tossicità e costo elevato delle resine fotosensibili, dalla scarsa resistenza meccanica dei prototipi e dalla tendenza di questi ultimi di deformarsi con relativa rapidità nel tempo a causa dell'azione della luce ambiente. La terza fase riguarda il post-trattamento con il quale si completa il processo di fotopolimerizzazione sia delle parti già solidificate dal laser che della resina liquida ancora intrappolata all'interno del pezzo. Esso consiste nell'esposizione del particolare ad una lampada ad ultravioletti la cui durata è funzione del tipo di resina utilizzata e della complessità della geometria. Al termine si ottiene la cosiddetta *red part*. L'ultima fase è la pulizia e la finitura con la quale si provvede all'asportazione dei supporti e alla finitura manuale del prototipo.

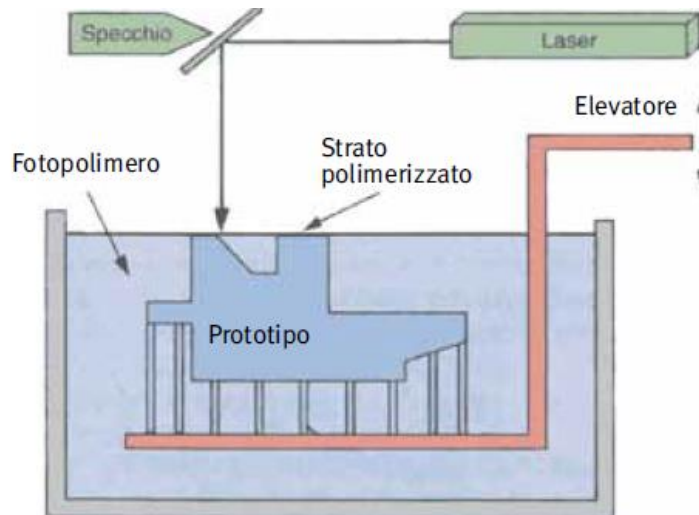


Figura 60: Processo di stampa SLA (Ceppi; 2012).

- Metodo con letto di polvere e testine inkjet:** PP (*Plaster-based 3D Printing*) è un metodo di stampa 3D consiste nell'utilizzare una testina *inkjet* che stampa su un letto di polvere (gesso, amidi, resine) un legante, procedendo di strato in strato fino al completamento del modello. La stampante crea il modello uno strato alla volta, spargendo uno strato di polvere (gesso o resine) e stampando con il getto d'inchiostro un legante nella sezione trasversale. Il processo viene ripetuto finché non è stampato ogni strato. Questo metodo permette anche di realizzare sporgenze, infatti la polvere non raggiunta dal legante fa da supporto al modello, e in questo modo è possibile creare praticamente qualsiasi sottosquadro. È inoltre riconosciuto come il metodo più veloce. Un grande vantaggio di questa tecnica è la possibilità di miscelare del colore al legante, creando oggetti con colori reali. La scarsa resistenza meccanica e l'aspetto poroso delle superfici dei modelli creati rappresentano purtroppo i limiti di questa tecnica. L'estetica e la funzionalità dei modelli può essere migliorata con trattamenti successivi con cere e polimeri tramite impregnazione.

4.3. ESEMPI DI STAMPANTI 3D

Questa ricerca è stata fatta per capire che tipo di stampanti sono presenti in commercio e che caratteristiche tecniche hanno. Il mercato delle stampanti 3D è ora in forte ascesa ed è quindi impossibile trattare e descrivere tutte le stampanti presenti in commercio. In questo capitolo si parlerà di tre aziende in particolare: la *3D System* e la *MakerBot*, macchine presenti anche nel laboratorio dell'Università di Bologna e la *WASP*, ditta ravennate leader nelle stampe 3D.

Una azienda a cui si è fatto riferimento è la *3D SYSTEMS* (Zcorp website) e di seguito verranno riportati alcuni esempi di stampanti con relative descrizioni e prodotti realizzati. Questa azienda ha realizzato prodotti che stampano direttamente da dati CAD e BIM e rappresentano lo standard in termini di velocità, resa del colore, convenienza e semplicità d'uso e sono in grado di soddisfare le esigenze più diverse, dall'istruzione superiore agli ambienti commerciali più esigenti. La possibilità di utilizzo del colore produce modelli con colori realistici senza l'uso di vernici, rendendo possibile valutare al meglio l'aspetto e lo stile dei design dei prodotti. Grazie alla presenza di più testine di stampa, è possibile garantire una gamma di colori precisi e reali a 24 bit, come una stampante 2D.

I costi di esercizio sono minimi cioè un quinto rispetto ai costi delle altre tecnologie in quanto il costo del materiale per le parti finite è pari a \$ 0,20 al centimetro cubo ed il materiale non sfruttato viene riutilizzato per la stampa successiva, eliminando quindi gli scarti.

La stampante presente anche nel laboratorio SILAB del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna è la **ZPrinter 310** (Figura 61). È una stampante monocromatica ed è una delle più convenienti.



Figura 61: Stampante ZPrinter 310.

Il principio di funzionamento è il PP (plaster based 3D printing) e all'interno è dotata di una polvere costituita dal 90% di gesso, di un liquido (90% di acqua) ed infine una testina di stampa. La macchina scarica l'inchiostro in un serbatoio apposito, e lo sostituisce con la colla. All'interno sono presenti due vasche, una rappresenta il piano di lavoro, l'altra invece funge da serbatoio, entrambe piene di polvere, le quali vengono alzate e livellate tramite un carrello, lo scopo è quindi quello di ottenere un piano perfettamente orizzontale. Una volta livellati i due piani, la testina spruzza la colla nel piano di lavoro e realizza un layer (uno strato), successivamente questo piano si abbassa di circa 8 decimi di millimetro e viene spolverato un velo di polvere dalla vasca del serbatoio al piano di lavoro ed infine viene inserita altra colla nello strato appena eseguito e così via. In sostanza, strato dopo strato viene costruito l'oggetto. Una volta finita questa procedura ci sarà la vasca del serbatoio quasi vuota e nell'altra vasca, nascosto in mezzo alla polvere, ci sarà il modello. Il modello viene estratto e pulito con una pistola ad aria compressa dalla polvere in eccesso con grande delicatezza in quanto il materiale è assai fragile (Figura 62). L'ultimo passo è quello di rendere l'oggetto meno fragile e più robusto infiltrando il modello con della resina epossidica. Questo processo è del tutto manuale in quanto la resina deve essere spennellata sull'oggetto. Per ottenere un modello colorato si può inserire del colorante nella resina.



Figura 62: Esempio di un modello stampato.

Le caratteristiche di questo tipo di stampante sono:

- Colore: monocromatica;
- Risoluzione: 300 x 450 dpi;
- Velocità di costruzione verticale: 25 mm/ora;
- Dimensioni di costruzione: 203 x 254 x 203 mm;
- Materiali disponibili: materiale composito ad alte prestazioni, materiale per fusione diretta o a cera persa, materiale elastomerico;
- Spessore dello strato: $0,089 \div 0,203$ mm;
- Numero di getti: 304;
- Formati di file per la stampa: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR;
- Dimensioni dell'apparecchiatura: 74 x 86 x 109 cm;
- Peso dell'apparecchiatura: 115 kg.

Un altro tipo di stampante è la **ZPrinter 250** (Figura 63). È una stampante dalla massima convenienze e crea modelli 3D di elevata qualità e multicolore (Figura 64).

Le caratteristiche di questo tipo di stampante sono:

- Colore: 64 colori esclusivi (colore spot di base);
- Dimensione minima per caratteristica: 0,4 mm;

- Risoluzione: 300 x 450 dpi;
- Velocità di costruzione verticale: 20 mm/ora;
- Dimensioni di costruzione: 236 x 185 x 127 mm;
- Materiale: composito ad alte prestazioni;
- Spessore dello strato: 0,1 mm;
- Numero di getti: 604;
- Formati di file per la stampa: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR;
- Dimensioni dell'apparecchiatura: 74 x 79 x 140 cm;
- Peso dell'apparecchiatura: 165 kg.



Figura 63: Stampante ZPrinter 250.



Figura 64: Esempio di un modello stampato.

Un altro tipo di stampante è la **ZPrinter 650** (Figura 65). È una stampante automatica che crea modelli 3D di qualità superiore, massima risoluzione, multicolore e massima dimensioni di costruzione (Figura 66).

Le caratteristiche di questo tipo di stampante sono:

- Colore: 390.000 colori (5 testine di stampa, compresa quella del nero);
- Risoluzione: 600 x 540 dpi;
- Dimensione minima per caratteristica: 0,1 mm;
- Automazione: completa (impostazione e monitoraggio automatici/caricamento automatico della polvere/recupero e rimozione automatici della polvere/cartucce di collante a scatto/pannello di controllo intuitivo);
- Velocità di costruzione verticale: 28 mm/ora;
- Dimensioni di costruzione: 254 x 381 x 203 mm;
- Materiali disponibili: materiale composito ad alte prestazioni;
- Spessore dello strato: 0,089 ÷ 0,102 mm;
- Numero di getti: 1520;
- Formati di file per la stampa: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR;
- Dimensioni dell'apparecchiatura: 188 x 74 x 145 cm;
- Peso dell'apparecchiatura: 340 kg.



Figura 65: Stampante ZPrinter 650.



Figura 66: Esempio di modelli stampati.

Un'altra azienda a cui si è fatto riferimento è la *MakerBot Replicator* (MakerBot website). Una stampante di questa azienda presente in laboratorio è la **MakerBot Replicator** (Figura 67).



Figura 67: Stampante MakerBot Replicator.

È una stampante a filo, il suo principio di funzionamento è il FDM, e utilizza una bobina di materiale PLA (plastiche di acido polilattico) che si fonde a 200°C e, non avendo ritiro, è molto semplice da utilizzare ma le sue proprietà meccaniche non sono eccezionali. Il concetto di funzionamento è che c'è un filo che va ad una testina, la testina a sua volta ha un estrusore (cioè ha un motorino che spinge fuori il filo) sotto ad esso è presente un riscaldatore controllato elettronicamente e quindi consente di gestire la temperatura. Infine è presente un ugello quindi il filo da un diametro di partenza diventa molto più sottile. In questo modo si ha la possibilità di cambiare la temperatura e di aumentare o diminuire la velocità di estrusione: combinando questi due elementi si può decidere se il filo all'uscita sia più grosso o più sottile in termini di diametro. La testina viene posizionata sul piano di lavoro e viene costruito l'oggetto. Il limite di questa tecnologia è la difficoltà di gestire i sottosquadri e questo problema viene superato in quanto la stampante si crea un supporto, detto *raft* (Figura 68), cioè un elemento di sostegno che essa si costruisce automaticamente per poter creare il modello. È dotata di uno schermo LCD full color 3.5 pollici di interfaccia utente che ha lo scopo di accedere alla libreria degli oggetti, visualizzare le anteprime del file modello 3D e il tempo che serve per terminare la stampa.

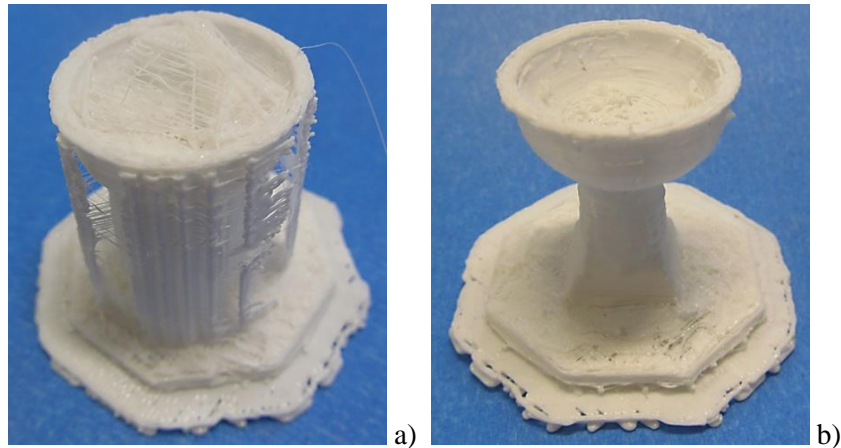


Figura 68: Esempio di modello stampato prima della pulizia (a) e dopo la rimozione del raft (b).

Le caratteristiche di questa stampante sono:

- Colore: monocromatico;
- Tecnologia di stampa: Fused Deposition Modeling (FDM);
- Risoluzione dello strato: 0.1 mm;
- Materiali: PLA filamento;
- Diametro del filamento: 1.75 mm;
- Diametro dell'estrusore: 0.4 mm;
- Software bundle incluso: MakerBot Desktop;
- Dimensione del prodotto: 528 x 441 x 410 mm;
- Dimensione della stampa: 252 x 199 x 150 mm;
- Tipi di file supportati: STL, OBJ, THING, MAKERBOT;
- Peso del prodotto: 16 kg.

Un ulteriore esempio di stampante 3D sempre della stessa azienda è la **MakerBot Replicator Z18** (Figura 69). Il principio di funzionamento di questa stampante è lo stesso descritto per la stampante precedente ma può fabbricare modelli di dimensioni extra-large.

Le caratteristiche di questa stampante sono:

- Colore: monocromatico;

- Tecnologia di stampa: Fused Deposition Modeling (FDM);
- Risoluzione dello strato: 0.1 mm;
- Materiali: PLA filamento;
- Diametro del filamento: 1.75 mm;
- Diametro dell'estrusore: 0.4 mm;
- Software bundle incluso: MakerBot Desktop;
- Dimensione del prodotto: 493 x 565 x 861 mm;
- Dimensione della stampa: 300 x 120 x 180 mm;
- Tipi di file supportati: STL, OBJ, THING, MAKERBOT;
- Peso del prodotto: 41 kg.



Figura 69: Stampante MakerBot Replicator Z18.

Un'ultima azienda di stampanti 3D è la *WASP* (*WASP website*).

Una stampante propria di questa azienda italiana è la **DeltaWASP 2040 Turbo** (Figura 70). Il piano riscaldato e l'ambiente a temperatura controllata garantiscono un ritiro controllato del materiale e risultati migliori a livello di stampa finale. La stampante è molto veloce per ottenere il modello stampato, fino a 1000 mm/s per passare dall'idea all'oggetto.



Figura 70: Stampante DeltaWASP 2040 Turbo.

Le caratteristiche di questo tipo di stampante sono:

- Tecnologia utilizzata: FDM;
- Area di stampa: 20 x 40 cm;
- Definizione di stampa: 0.05 mm;
- Diametro del filamento: 0.4 mm;
- Velocità massima: 600 mm/s;
- Tipi di file supportati: STL, OBJ, GCODE;
- Dimensioni della macchina: 47 x 47 x 87 cm;

- Peso: 20 kg.

Un'altra tipologia di stampante è la **DeltaWASP 60100** (Figura 71). Ha un'area di stampa molto generosa in grado di offrire prodotti di grande dimensioni (Figura 72).



Figura 71: Stampante DeltaWASP 60100.



Figura 72: Esempio di un modello stampante

Le caratteristiche di questa stampante sono:

- Tecnologia utilizzata: FDM;
- Area di stampa: 60 x 100 cm;
- Definizione di stampa: 0.01 mm;
- Diametro del filamento: 0.4 mm;
- Velocità massima: 200 mm/s;
- Tipi di file supportati: STL, OBJ, GCODE;
- Dimensioni della macchina: 267 x 122 x 127 cm;
- Peso: 250 kg.

Una tra le più rivoluzionari stampanti di questo settore è il prototipo **BigDelta** (Figura 73) con un'altezza pari a 12 m.



Figura 73: Stampante BigDelta.

La costruzione della BigDelta (chiamata così in quanto è la stampante “gigante” per la stampa di case) procede per tappe nel corso di tre anni, a partire dal 2012. La stampa 3D è incentrata sulla deposizione di materiale, per questo motivo è il campo di sperimentazione per eccellenza per quanto riguarda i materiali compositi. La ricerca in questo senso è ancora tutta da esplorare. Per quanto riguarda l’obiettivo di una casa a km 0, il vantaggio dell’*additive manufacturing* è proprio quello di fornire diverse soluzioni legate al territorio, consentendo di impastare materiali sul posto. La WASP sviluppa diversi tipi di estrusori per impasti fluido-densi, dunque il cambiamento di stato del materiale depositato avviene tramite l’evaporazione di un solvente che può essere di diversa natura, tra cui l’acqua stessa. Questo tipo di sperimentazione crea una serie di infinite combinazioni di materiali utilizzabili. E’ evidente che, al fine di incentivare l’autoproduzione e il benessere, quello della scelta dei materiali e la ricerca ad essa attinente sono un punto cruciale.

Era necessario un cambiamento: usciti dalla logica dei materiali plastici, la ricerca è stata rivolta verso materie prime che fossero donate dalla terra, ad alto rendimento, con un costo di produzione basso, per la crescita delle quali non servissero concimi chimici

e che fossero coltivabili ovunque. Una casa in argilla non è nulla di nuovo, è anzi un'applicazione antichissima. La tecnologia 3D consente però di realizzare costruzioni molto gradevoli esteticamente in tempi brevi e con una necessità di manodopera praticamente pari a zero. La ricerca sui materiali è un'esigenza primaria e si dimostra quindi incessante: l'innovazione davvero sorprendente che è attualmente allo studio per impedire che l'argilla si ritiri seccandosi è l'inserimento dei semi di alcune graminacee all'interno dell'impasto da stampare. L'approccio delta è stato scelto proprio perché i tre assi verticali consentono bassi consumi energetici, quello che si muove è solo l'estrusore. I bracci della BigDelta trasportano all'incirca 70 kg, per un consumo ridotto a meno di un decimo rispetto alle stampanti a portale ed equivalente a circa 300 watt, perfettamente gestibile quindi con una batteria e pochi metri quadri di pannelli solari. Oltre a ciò, la BigDelta è stata progettata per essere montata in tempi brevi: a tre persone occorrono circa due ore.

Un'ulteriore passo avanti è stato l'evoluzione di un nuovo estrusore in grado di gestire la ritrazione, cioè può interrompere il lavoro e ritirare il materiale estruso in modo da poter riprendere l'erogazione in maniera micrometrica. Esso consuma pochissimo e ha un controllo costante a tutte le velocità e, grazie all'ugello rotante, il materiale non viene solo estruso ma anche impastato in uscita in modo da permettere una corretta adesione dei layer uno sull'altro (Figura 74).



Figura 74: Particolare della stampa 3D.

5. CASO DI STUDIO: CHIESA DI SANTA LUCIA DI BOLOGNA

5.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'ex chiesa di Santa Lucia sorge nel territorio di Bologna, comune italiano di 386386 abitanti e capoluogo della regione Emilia-Romagna. La piazzetta e il sagrato della chiesa sono ubicati a metà di via Castiglione a circa un chilometro da Piazza Maggiore. Nel corso dei secoli è appartenuta a diversi soggetti ed è attualmente l'Aula Magna dell'Università degli Studi di Bologna, la quale offre uno spettacolo fortemente suggestivo. La costruzione della chiesa è iniziata nel 1623, conclusa nel 1730 e sconsacrata nel 1866 ma già dalla seconda metà del Cinquecento è stata sede di attività formative di carattere religioso.

Rispettivamente, in Figura 75 e in Figura 76, è mostrato l'inquadramento territoriale di Bologna e dell'ex chiesa di Santa Lucia.



Figura 75: Inquadramento territoriale del comune di Bologna (in rosso) (Provincia di Bologna website).



Figura 76: Inquadramento territoriale dell'ex chiesa di Santa Lucia (Google Maps website).

La facciata di Santa Lucia, mostrata in Figura 77, si presenta con tutto il fascino delle architetture non finite, cromaticamente vibrante nel colore rosso bruno del cotto, per il sottile gioco chiaroscurale creato dalle continue sporgenze nella muratura delle immorsature di mattoni rimasti a vista. Infatti, per complicazioni di ordine economico, subentrate con l'avanzare dei lavori, il rivestimento della struttura portante della facciata non venne mai completato, se non nella parte bassa con la realizzazione dell'alto basamento su cui si impostano le tronche colonne e lesene che avrebbero dovuto movimentarla e che era stata pensata a due ordini sovrapposti.



Figura 77: Facciata odierna dell'ex chiesa di Santa Lucia.

5.2. EVOLUZIONE STORICA

Le origini dell'edificio, fondato da San Petronio, risalgono al 432 e la sua fabbricazione è stata eseguita come dedica alla Vergine Martire Lucia.

La chiesa si trovava in una zona segnata dalla presenza della croce ambrosiana e su una direttrice stradale rivolta verso il suburbio meridionale che era oggetto di insediamento residenziale già in età romana. Collocata dunque fuori dalle prime mura di selenite, la chiesa di Santa Lucia non ebbe vita facile tanto che nuovamente la storiografia seicentesca riporta la notizia della sua distruzione ad opera degli Ungari nel 903 (Scannavini; 1988).

Nel 1208, sulle fondamenta della primitiva struttura, venne ricostruita una chiesa che ospitò i canonici Lateranensi di San Giovanni in Monte fino al 1418, grazie alla licenza che ottennero dal vescovo Gerardo Ariosto. Gli stessi canonici la gestirono direttamente dal 1295 al 1418 poi la cedettero al parroco.

La Chiesa rimase parrocchiale anche quando, nel 1562, il Cardinale Giacomo Savelli, dando esecuzione ad una bolla papale di Papa Pio IV, donò il 9 novembre 1562 ai gesuiti la piccola chiesa parrocchiale per farne il centro della loro attività di formazione spirituale.

L'assetto del tessuto urbano nella zona interessata dall'attività della Compagnia di Gesù fin dal suo primo instaurarsi in Bologna era, nella prima metà del Cinquecento, profondamente diverso da oggi (Figura 78).

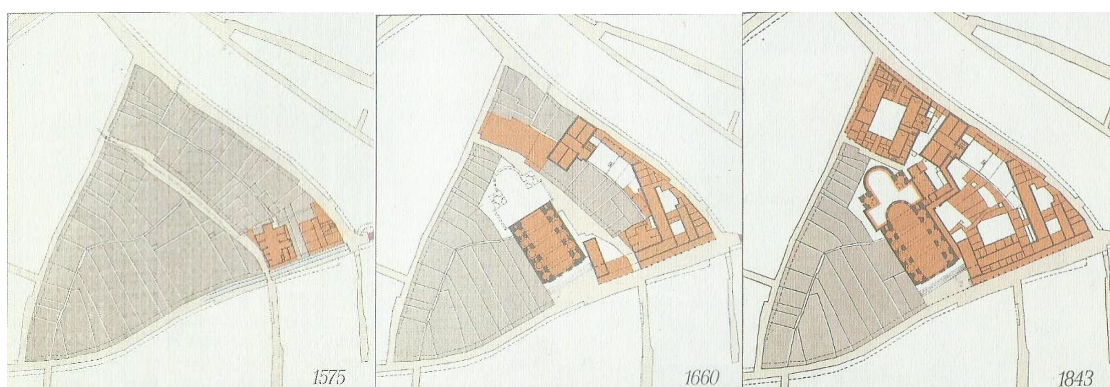


Figura 78: Analisi delle fasi di accrescimento degli insiemi architettonici e monumentali dal 1575 al 1843 dell'area (Scannavini; 1988).

La presenza del canale lungo la Via Castiglione e del campetto di Santa Lucia insieme alla teoria di abitazioni a piccola scala, davano una configurazione nettamente diversa rispetto a quella attuale (Figura 79), caratterizzata dalla mole della chiesa di Santa Lucia e dal compatto volume del collegio.



Figura 79: Vista dall'alto del tracciato di Via Castiglione. L'andamento irregolare sottolinea il percorso dell'antico canale (Scannavini; 1988).

I gesuiti iniziarono una paziente opera di acquisto di tutta una serie di edifici e terreni limitrofi dove nel 1551 aprirono il loro primo collegio cittadino, fino ad occupare una vasta area, denominata poi insula gesuitica, che arrivava fino a Via Cartoleria. In quest'ultima via aprirono altri due collegi: un detto Nobili, nell'edificio oggi occupato dal Liceo Galvani e nel Cinquecento, dopo che in esso vi aveva soggiornato anche San Francesco Saverio, fu ribattezzato col nome di questo santo, trasformando in cappella la stanza in cui aveva dormito; l'altro, il Collegio San Luigi, fondato nel 1645 dal conte Carlo Zani, si sarebbe poi trasferito nell'Ottocento in via d'Azeglio al posto del Collegio Montalto presso la chiesa di Sant'Antonio Abate.

I gesuiti, dopo le prime acquisizioni e grazie ad alcuni lasciti, ottennero anche la chiesa e annessi, e provvidero ad alcuni lavori di ampliamento e di adattamento dei locali in quanto questa chiesa, ad impianto medievale, trovatasi ad accogliere la vasta attività

gesuitica, si rilevò fin da subito inadeguata e il rettore del collegio di Bologna ne propugnò già dal 1565 l'ingrandimento, per il quale richiese a Giovanni Tristano un progetto, in occasione di un suo passaggio da Bologna. I lavori furono eseguiti solo nel 1574 in quanto al 28 settembre 1574 risale la concessione del senato di avanzare la chiesa a filo della casa Gozzadini, posta nell'angolo fra via Castiglione e via Cartoleria Vecchia (Figura 80).

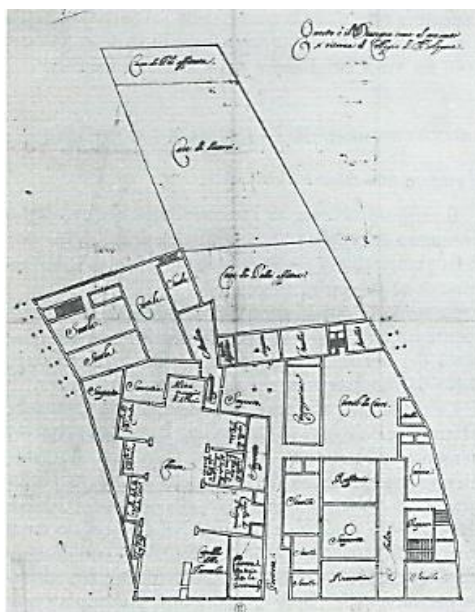


Figura 80: La vecchia chiesa, il collegio e le case adiacenti prima del 1623 (Scannavini; 1988).

L'assetto urbanistico della zona ebbe la sua definitiva alterazione quando nel 1623 i Gesuiti decisero di costruire una chiesa monumentale in linea con i nuovi canoni artistici dello stile barocco, allora imperante della decorazione e nell'arte religiosa: scelsero come modello architettonico la chiesa del Gesù di Roma nella quale il celebre artista Jacopo Barozzi, detto Vignola, aveva realizzato un'interessante struttura con un innovativo deambulatorio perimetrale (Fini; 2007). Questa struttura fu poi realizzata in tutte le chiese dell'ordine sparse in Europa e anche in Santa Lucia, il cui progetto (Figura 81) fu elaborato inizialmente dall'architetto Giovanni Battista Aleotti, il quale eseguì i primi disegni, ma il progetto definitivo, che segue i requisiti fissati esattamente dai padri, è l'architetto romano Girolamo Rainaldi che si limitò a fornire il disegno generale del prospetto (Figura 82), anche se poi i lavori furono seguiti sul campo dal padre gesuita Giacomo Ballerini (Rocchi; 1999).

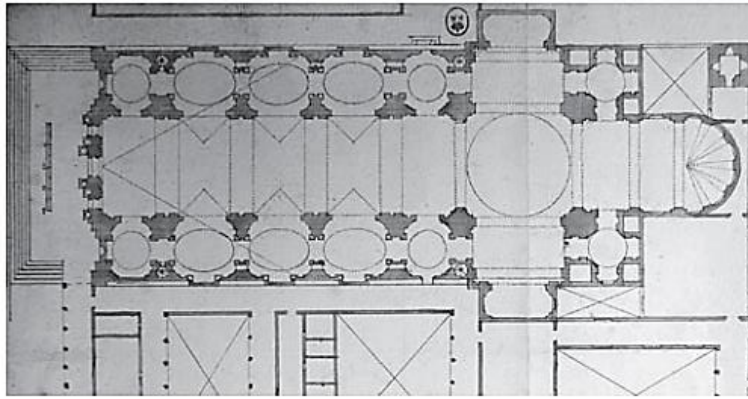


Figura 81: Progetto per Santa Lucia eseguito ma mai realizzato da Giovanni Battista Aleotti nel 1621 (Scannavini; 1988).

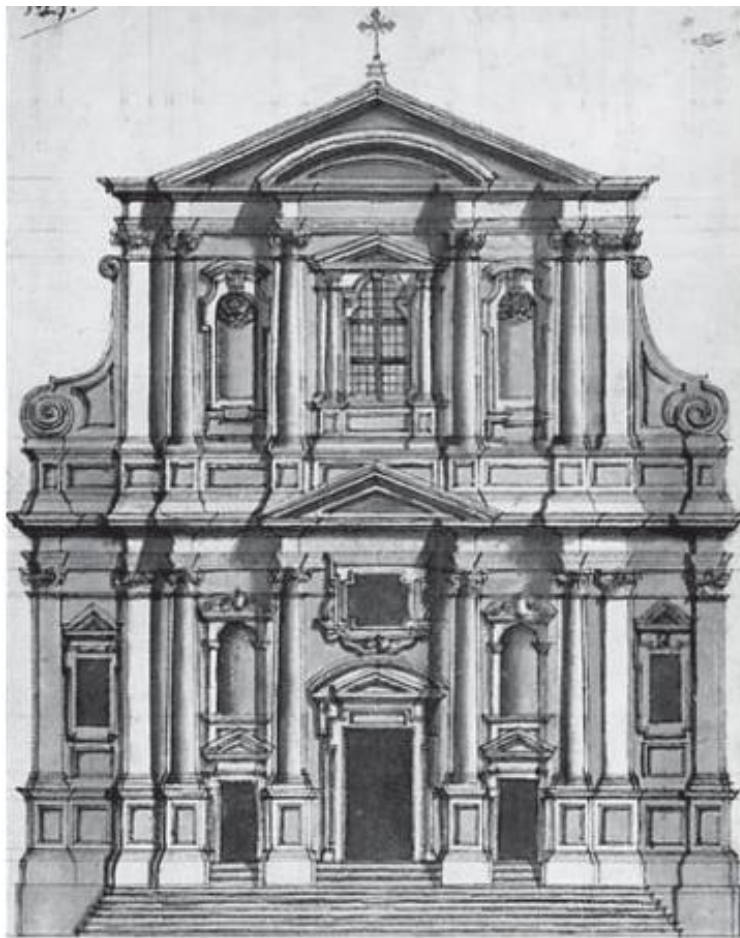


Figura 82: Progetto della facciata, secondo il progetto di Girolamo Rainaldi, mai realizzato (Scannavini; 1988).

La costruzione della chiesa occupò per parecchi anni le maestranze e al primitivo progetto si dovette ben presto rinunciare per le forti spese che richiedeva. Dal 1623 al 1659 i lavori proseguirono tra alterne vicende (nel 1630 un epidemia di peste, che colpì tutta l'Europa, decimò la popolazione e sconvolse anche il delicato bilancio gesuitico, che contava sia sugli affitti delle case e dei terreni di Bologna e Castel S.Pietro, ma soprattutto sulle pie donazioni di numerosi benefattori), tanto che la grande cupola non venne mai realizzata, sicché i pilastri d'imposta e l'abside monumentale sono rimasti incompiuti e così come tutti i rivestimenti esterni e l'intera facciata.

Nel 1635 si abbattono le casette e i portici che si affacciavano sul campo di Santa Lucia, nel 1644 si pose mano alla fabbrica del Collegio di Santa Lucia e si continuò l'edificazione della chiesa a partire dal 15 aprile. L'architetto Francesco Martini eseguì disegni e seguì personalmente i lavori che si protrassero fino all'inizio del 1648. Il lavoro nella chiesa era al grezzo, cioè mancava completamente la decorazione, che infatti fu eseguita nel 1649. Nel 1656 il grosso dei lavori murari era compiuto: negli anni seguenti ci si dedicò alle finiture sia delle decorazioni a stucco delle pareti che agli altari, e porre i vetri alle finestre. Anche l'imbianchino procedeva intanto con la dipintura della chiesa nei colori bianco e travertino, presumibilmente il primo sulla decorazione scultorea ed il secondo sugli sfondi lisci delle pareti.

Benché non ancora terminata, la chiesa era pronta per una prima inaugurazione dopo 36 anni dalla posa della prima pietra, e la cerimonia doveva essere solenne e fastosa per rendere soddisfazione ai numerosi cittadini che avevano contribuito alla sua costruzione con doni e lasciti e per mostrare alla città la potenza e la ricchezza della Compagnia di Gesù.

Per poter officiare, nel 1659 venne retto un muro provvisorio a chiudere la navata e le decorazioni, le lesene e i capitelli furono eseguiti in legno e tela in modo assai provvisorio. Alla chiesa venne accostata un'altra importante costruzione, il complesso sovrapposto della sacrestia e della cappella delle congregazioni: con questo edificio si chiuse definitivamente il campetto di Santa Lucia (Figura 83).

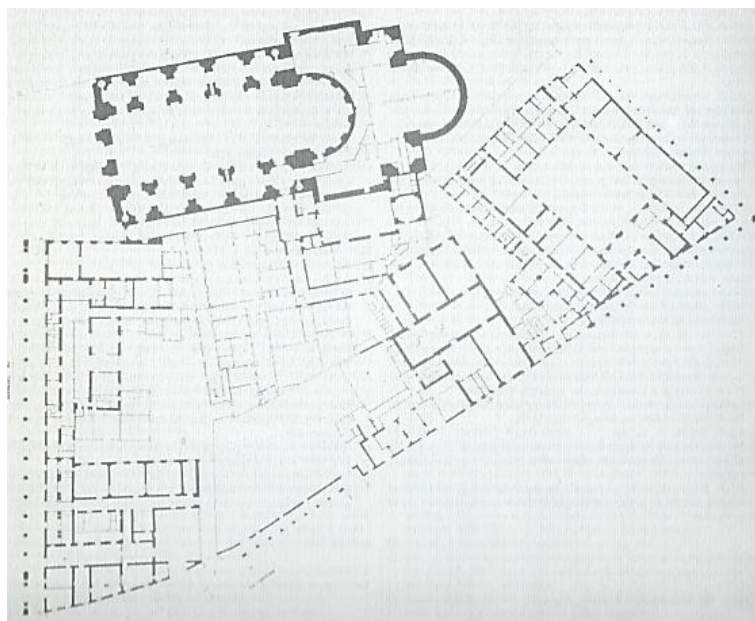


Figura 83: Rilievo del piano terreno del complesso monumentale della chiesa, congregazioni, collegi, scuole dei Gesuiti compreso tra le vie Castiglione, Cartolerie, dè Chiari (Scannavini; 1988).

Con la soppressione della Compagnia di Gesù ed il passaggio ai Barnabiti dell'eredità gesuitica nel 1774, si fermarono i lavori per il completamento della chiesa, anche perché i tempi dopo l'occupazione francese di Bologna non erano propizi a grandi imprese religiose. Infatti i Barnabiti evitarono la soppressione nel 1810 solo in virtù della funzione sociale da essi svolta con l'insegnamento ai giovani, ma solo con il ritorno di Bologna nello stato pontificio si poté pensare a sistemare degnamente la grande chiesa barocca.

La facciata, di cui si era iniziato il compimento decorativo nel 1730, restava nuda con le immorsature di mattoni pronte a ricevere lastre di macigno, cornicioni e colonne. La facciata vi appare divisa in due ordini sovrapposti, scanditi da colonne che la scompartiscono in campi rettangolari, mossi dal finestrone e da altre finestre minori e, nell'ordine inferiore dal portone centrale e dalle porte laterali. Solo a partire dal 1835 si formò un comitato per preparare un progetto di compimento della chiesa e raccogliere adesioni e sottoscrizioni tra i cittadini.

Inizialmente si pensò di concludere la navata centrale con un'abside che creasse una cappella maggiore poi, viste le numerose adesioni raccolte, si vagheggiò di poter ritornare al progetto seicentesco e di proseguire muri e pilasti già iniziati e la grande

cupola. Ma l'opera risultò superiore alle possibilità economiche e si dovette ritornare al progetto iniziale di concludere con una semplice abside la costruzione.

La liquidazione dell'asse ecclesiastico attuata dal governo italiano nel 1866 tolse ai Barnabiti tutte le proprietà gesuitiche e la chiesa di Santa Lucia, il 29 aprile 1873 fu ceduta dal comune alla società Ginnastica Virtus, che ne fece la sua palestra e fu utilizzata anche per varie manifestazioni (Figura 84).

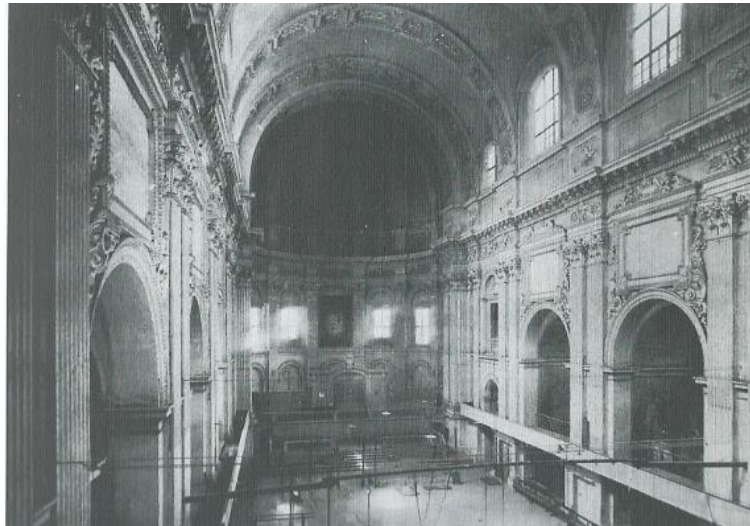


Figura 84: La navata della chiesa trasformata in palestra per la Virtus nel 1873 (Scannavini; 1988).

La sua destinazione a palestra durò fino alla fine della seconda guerra mondiale in quanto, nel 1945, l'amministrazione comunale revocò alla Virtus la concessione e utilizzò interamente lo stabile per le esigenze dell'istituto Aldini Valeriani. Dunque, dopo il 1866 gli usi incongrui a cui fu sottoposta la chiesa ne accelerarono il degrado (Figura 85, Figura 86), soprattutto degli stucchi e delle parti più basse, in vari punti forate, scalciate e più volte ridipinte.



Figura 85: La facciata della chiesa in una suggestiva immagine degli anni trenta (Archivio storico website).



Figura 86: Stati di degrado di un altare e di un cupolino della navata laterale (Archivio storico website).

Sventato il pericolo di una trasformazione integrale, prevista da avventati progetti del primo Novecento, a seguito del restauro avvenuto tra il 1987 e il 1989 (Figura 87),

commissionato per ospitare le celebrazioni per il IX Centenario dell'Università di Bologna, fu ricavata l'Aula Magna dell'Università degli Studi di Bologna, assieme ad altre varie sale.



Figura 87: Cantiere per il restauro della navata principale (Archivio storico website).

Operativamente, oltre al restauro e al consolidamento delle coperture, delle lanterne laterali, delle murature esterne e interne, degli intonaci, degli stucchi e degli altari-cappelle laterali (Figura 88), è stato previsto un adeguamento tecnologico (termo-illuminotecnico e acustico), una nuova pavimentazione e una dotazione di servizi e di spazi di sussidio alle attività proposte. Il progetto preliminare prevede un restauro quasi archeologico dell'originale abside interrotta nel 1732 (Figura 89) e mai completata e la ristrutturazione dello spazio fra le due absidi. Oltre al restauro e al consolidamento delle murature dell'abside interrotta, è prevista la realizzazione di una copertura lignea, limitata alla sola conchiglia absidale, al fine di lasciare uno spazio a cielo aperto fra

questa e l'abside ottocentesca, e la costruzione di due strutture autonome per servizi e uffici, collocate nelle due anse residue del transetto incompiuto.



Figura 88: Altare e cupolino di una navata dopo il restauro (Archivio storico website).

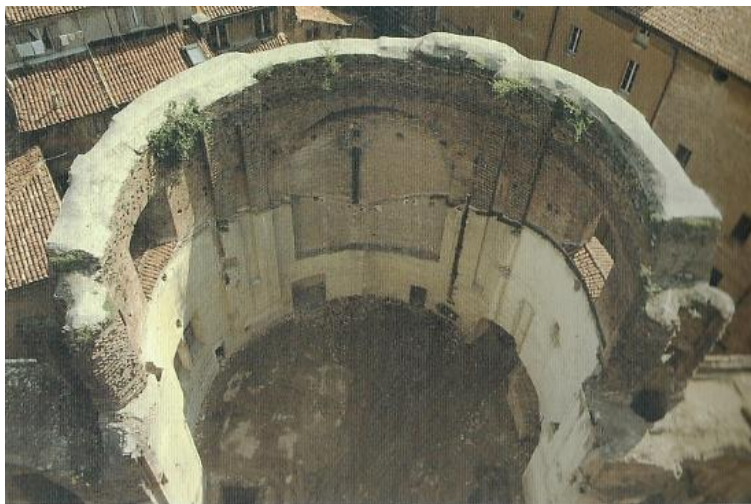


Figura 89: Vista dell'abside seicentesca incompiuta (Scannavini; 1988).

Per la imponente chiesa barocca il progetto funzionale prevede la realizzazione di un grande apparato in struttura lignea autonoma così articolato: palchi-tribune laterali e di testa, anfiteatro nella conchiglia absidale, poltroncine e mobili al centro. Questo assetto raggiunge la capienza massima di 1250 posti a sedere (Figura 90) e può funzionare come Aula Magna, sala convegni, concerti, celebrazione, ecc.

Circa due anni dopo l'inaugurazione dell'Aula Magna, viene inaugurata l'Aula absidale di Santa Lucia (Figura 91): oltre 350 posti a sedere, adiacente il blocco servizi

funzionali (guardaroba, servizi, sala stampa, saletta) con strutture metalliche autonome e tamponamenti in vetro all'interno delle anse definite dai transetti incompiuti in continuità spaziale con i due ambulacri laterali della sala grande di Santa Lucia, collegata con la sala grande attraverso un circuito interno televisivo con grande schermo.



Figura 90: Navata principale dopo il restauro (Scannavini; 1988).



Figura 91: Abside seicentesca dopo il restauro (Archivio storico website).

5.3. RILIEVO DELLA FACCIATA

Il rilievo effettuato della ex Chiesa di Santa Lucia è stato di due tipi:

- rilievo mediante il Laser Scanning Terrestre (TLS);
- rilievo fotogrammetrico.

La durata complessiva del rilievo in situ è stata di circa 3 ore e ha visto la collaborazione di diversi incaricati (Sara Schena, Caterina Salamone, Ilaria Dal Borgo, Valentina Alena Girelli, Lorenzo Cericola, Rocco Ravella ed il professore Antonio Zanutta) che si sono occupati della gestione dello strumento, dell'esecuzione delle prese fotografiche e della vigilanza della piazza per far in modo che persone estranee al rilievo non interferissero con il rilievo stesso.

5.3.1. RILIEVO TLS

La prima fase riguarda il posizionamento dei target, cioè dei quadretti retroriflettenti necessari per unire in fase di post-processing le nuvole di punti create da ogni posizione di scansione. La particolarità di questi target è la superficie riflettente che permette, in fase di rilievo laser, di creare delle aree di punti ad elevata densità. La registrazione di un numero di punti notevolmente maggiore rispetto alle aree limitrofe, consente delle collimazioni molto accurate in post processing.

Per concatenare le diverse nuvole di punti sono necessari punti doppi in modo tale da roto-traslare le singole scansioni nel sistema di riferimento adottato.

Il modello matematico è il seguente:

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \lambda R \bar{x} \quad (1)$$

Dove \bar{X} è il vettore delle coordinate oggetto, \bar{X}_0 è il vettore che comprende i tre parametri di traslazione, λ è il fattore di scala, R è la matrice di rotazione e \bar{x} è il vettore delle coordinate immagine.

Le incognite sono in totale 6 (tra parametri di traslazione e i tre angoli di rotazione) quindi per una trasformazione tridimensionale risultano necessario la conoscenza delle coordinate di tre punti.

La qualità delle collimazioni è funzione della densità dei punti. I target retroriflettenti costituiscono i riferimenti più accurati grazie alla densità con la quale vengono misurati. Altri punti che possono essere impiegati per irrobustire il calcolo, sono elementi naturali facilmente identificabili nelle nuvole di punti: ad esempio lo spigolo di una porta, il vertice di una finestra, ecc. Anche se oggetto d'interesse era la facciata della chiesa, i target sono stati distribuiti in modo tale da coprire uniformemente il perimetro della piazzetta creando pertanto una configurazione angolare isotropa.

Sono stati posizionati 7 target e sono state eseguite 5 scansioni laser (Figura 92).



Figura 92: Monografia della piazzetta con il posizionamento dei target (rettangoli) e delle stazioni di scansione laser (cerchi).

In Figura 93 vengono mostrate le fotografie che indicano il posizionamento dei target sui punti prestabiliti e nominati come da rielaborazione dati con il software *Riscan Pro*.



Figura 93: Posizionamento dei target: target_largo (a), target_gronda_sx (b), target_sl (c), target_gronda_dx (d), target_gronda_lat (e), target_avv (f), target_gronda_ret (g).

Una volta fissati i target e posizionato il laser scanner nella posizione iniziale di scansione, denominata *Centrale*, è stato messo in stazione lo strumento. Una livella sferica elettronica ha permesso di realizzare la scansione centrale con l'asse principale dello strumento in assetto verticale. Tale scansione, proprio per questa caratteristica è stata nel seguito utilizzata come riferimento per le altre scansioni. Ogni singola scansione infatti genera una nuvola di punti densa riferita in un sistema cartesiano ortogonale locale avente per origine il centro strumentale stesso.

Il rilievo laser è stato condotto mediante lo strumento RIEGL VZ400 (Figura 94) il quale misura la distanza in base al tempo di volo.



Figura 94: Laser RIEGL VZ400.

Lo strumento ha una portata massima di 600 m e una velocità di acquisizione fino a 125.000 punti al secondo, è caratterizzato da un campo visivo di 360° in orizzontale e 100° in verticale con una risoluzione angolare di 1,8 arcsec, corrispondente ad una risoluzione massima di 5 mm alla distanza di 100 m. Il meccanismo di scansione si basa sulla rotazione veloce di uno specchio poligonale che fornisce linee di scansione completamente lineari, unidirezionali e parallele. Lo strumento può essere utilizzato in due modalità: *high speed* per misurazioni fino a 280 metri ed elevata velocità di acquisizione e in *long range* per acquisizioni fino a 600 metri ma con velocità ridotta.

Il laser ad alta precisione permette di ottenere una capacità di misura ottime, anche in condizioni atmosferiche avverse, e la valutazione di echi multipli.

Il RIEGL VZ-400 è uno strumento di rilevamento molto compatto e leggero, montabile in qualsiasi orientamento e anche in condizioni di spazio limitato. In Tabella 3 vengono

descritte le principali caratteristiche e applicazioni mentre, in Tabella 4, vengono mostrate le specifiche tecniche dello strumento.

CARATTERISTICHE PRINCIPALI	APPLICAZIONI PRINCIPALI
<ul style="list-style-type: none"> • Acquisizione dati ad alta velocità; • Ampio campo di vista, controllabile durante la scansione; • Alta precisione, basata sulla digitalizzazione e l'elaborazione di forme d'onda in linea; <ul style="list-style-type: none"> • Capacità di destinazione multipla; • Funzionalità di misura superiore in condizioni atmosferiche avverse; • Appoggi di monitoraggio ad alta precisione per la macchina fotografica digitale opzionale; • Sensori di inclinazione integrati e piombo laser; <ul style="list-style-type: none"> • Ricevitore GPS integrato con antenna; • Diverse interfacce (LAN, WLAN, USB 2.0); <ul style="list-style-type: none"> • Memorizzazione dati interna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Architettura; • Ingegneria civile; • Archeologia; • Modellazione strutturale e architettonica; <ul style="list-style-type: none"> • Sondaggi.

Tabella 3: Caratteristiche e applicazioni del laser RIEGL VZ-400 (modificato da Rielg website).

RIEGL VZ-400	
Campo visivo	360° (H)x 100°(V)
Massima distanza di misura (in modalità <i>long range</i>)	Per target naturali: $\rho \geq 20\%$ fino a 280 m
	Per target naturali: $\rho \geq 80\%$ fino a 600 m
Divergenza del raggio laser	0,3 mrad
Velocità di misurazione	42000 misure/sec (<i>long range</i>)
	122000 misure/sec (<i>high speed</i>)
Massimo numero di target per impulsi	Praticamente illimitato
Lunghezza d'onda del laser	Infrarosso vicino
Accuratezza	5 mm
Ripetibilità	3 mm

Tabella 4: Scheda tecnica RIEGL VZ400.

Il sistema di acquisizione del laser è basato sul sistema *Time of Flight* (TOF), ovvero a tempo di volo: la posizione, ossia le coordinate tridimensionali, di un punto sulla superficie dell'oggetto in acquisizione, sono ricostruite confrontando il tempo che l'impulso laser impiega ad essere rilevato dal sensore CCD, dopo essere stato inviato dalla sorgente sull'oggetto stesso.

Prima della scansione è necessario definire la risoluzione massima dell'acquisizione ed è possibile impostare le dimensioni dell'area di acquisizione, all'interno di tutta l'area acquisibile a quella distanza oggetto-strumento. La geometria 3D della superficie dell'oggetto viene istantaneamente visualizzata al monitor sotto forma di nuvola di punti 3D. Ad ognuno dei punti acquisiti è associata una terna di coordinate X, Y, Z in un sistema di riferimento con l'origine collocata al centro dello strumento. Il fascio laser dalla superficie dell'oggetto porta con sé non solo un'informazione geometrica, ma anche una di tipo materico: il raggio riflesso, infatti, ha conseguentemente un'intensità minore rispetto a quello emesso dalla sorgente, in dipendenza del tipo di materiale di cui l'oggetto è costituito e dall'inclinazione del raggio incidente. Tale informazione è restituita nella nuvola di punti acquisita.

Il sistema è corredato, in cima al laser, di una camera digitale a colori rigidamente connessa all'apparecchio, che fotografa l'ambiente scansionato e permette quindi di restituire una nube di punti colorata a conclusione del ciclo di misurazione. La camera fotografica utilizzata è una reflex Nikon D90 con un sensore CMOS da 23.6 x 15.8 mm da 12.3 megapixel e con obiettivo da 50 mm.

Durante il rilievo, lo strumento rimane collegato ad un PC sul quale, attraverso il software dedicato, è possibile comandare lo strumento e monitorare in tempo reale l'acquisizione dei dati. Per la fase di acquisizione e per una parte delle successive elaborazioni è stato usato il software *Riscan Pro*, a corredo dello strumento.

Una volta individuato lo stato architettonico presente, per ottenere un modello 3D completo, è stato necessario procedere con un'ulteriore scansione per il raffittimento dei punti della nuvola che ricreano la morfologia tridimensionale della piazza e soprattutto della facciata della chiesa.

Per ottenere un risultato ottimale relativo alla scansione della facciata, si è provveduto a fare un'altra scansione dalla stessa stazione *Centrale* in modo tale da rilevare l'intera facciata, poiché la distanza di posizionamento dello strumento non è sufficientemente ampia da permettere il rilevamento totale del fronte con una sola scansione.

Per questo motivo, per ottenere la porzione superiore della facciata della chiesa è stato inclinato lo strumento di 30° verso l'alto. Si vuol far notare che la posizione del centro dello strumento è cambiata perché è un punto fisico, per cui in fase di rielaborazione si deve tener conto di tale cambiamento di posizione.

Essendo una seconda scansione, quindi una seconda nuvola di punti, lo strumento va ad individuare i target rilevati con la prima scansione per potersi concatenare una volta finita la campagna di rilevamento.

Le operazioni successive sono le stesse che sono state eseguite con la prima scansione.

Per ottenere quindi un buon risultato sono state effettuate cinque "Scan Position":

- **Centrale** (su cui verranno concatenate tutte le altre nuvole di punti): lo strumento viene posizionato in modo simmetrico davanti alla facciata nel centro della piazzetta;

- **Centrale inclinata:** la posizione è la stessa rispetto a quella *Centrale* ma lo strumento è inclinato di 30° in modo da rilevare la parte più alta del fronte della chiesa;
- **Sinistra:** lo strumento è stato posizionato nelle vicinanze del portico situato sulla sinistra della piazzetta;
- **Destra:** lo strumento viene posizionato nelle vicinanze del portico e della scalinata sulla destra della piazzetta;
- **Avvocato:** lo strumento viene posizionato nella finestra posta al primo piano di uno studio di Avvocati, il quale si affaccia sulla piazzetta della chiesa. Lo strumento è stato smontato dal treppiedi e posizionato in corrispondenza di una finestra situata al lato opposto della chiesa di Santa Lucia.

5.3.2. RILIEVO SPEDITIVO

FOTOGRAMMETRICO

Parallelamente al rilievo con il Laser, sono state scattate varie strisciate di immagini (fotogrammi) con una camera digitale Canon EOS 6D, Figura 95, le quali serviranno per la ricostruzione della facciata della chiesa per mezzo della tecnica fotogrammetrica terrestre. Il numero di foto scattate è molto elevato, circa 340 fotogrammi, in modo da avere una grande sovrapposizione delle geometrie e quindi una grande ridondanza dei dati, e il tempo impiegato per questa fase è stato molto breve, circa 15 minuti.



Figura 95: Canon EOS 6D (Canon website).

Questo dispositivo presenta un sensore CMOS da 20 megapixel che offre prestazioni buone in condizioni di scarsa illuminazione e produce immagini con un livello di rumore abbastanza basso.

In Tabella 5 vengono riportate le caratteristiche del sensore immagine. Come già in precedenza descritto, il sensore, ha il compito di catturare la luce incidente tramite delle parti fotosensibili e, tramite altre componenti, trasformarla in un segnale digitale.

TIPO	CMOS da 36 x 24 mm
PIXEL EFFETTIVI	Circa 20,2 megapixel
PIXEL TOTALI	Circa 20,6 megapixel
RAPPORTO	3:2
FILTRO LOW-PASS	Incorporato/Fisso con rivestimento al fluoro
PULIZIA SENSORE	Sistema integrato di pulizia EOS
TIPO FILTRO COLORE	Colori primari

Tabella 5: Caratteristiche sensore immagine Canon EOS 6D.

Il rilievo fotogrammetrico è stato appunto speditivo e rapido, cioè non sono state eseguite esattamente le regole da applicare per la fotogrammetria terrestre. Per poter eseguire un rilievo *ad hoc* sarebbe stato necessario fare delle fotografie per livelli, cioè ad altezze diverse, con l'impiego, ad esempio, di un treppiede telescopico o di un carrello elevatore in modo da raggiungere altezze notevoli.

Dunque sono state scattate molte fotografie in assetto pseudo - normale, con assi della camera convergenti e con un livello di ridondanza notevole ma è da sottolineare il fatto che le strisciate sono avvenute tutte da terra seppure con una geometria di presa regolare (Figura 96).

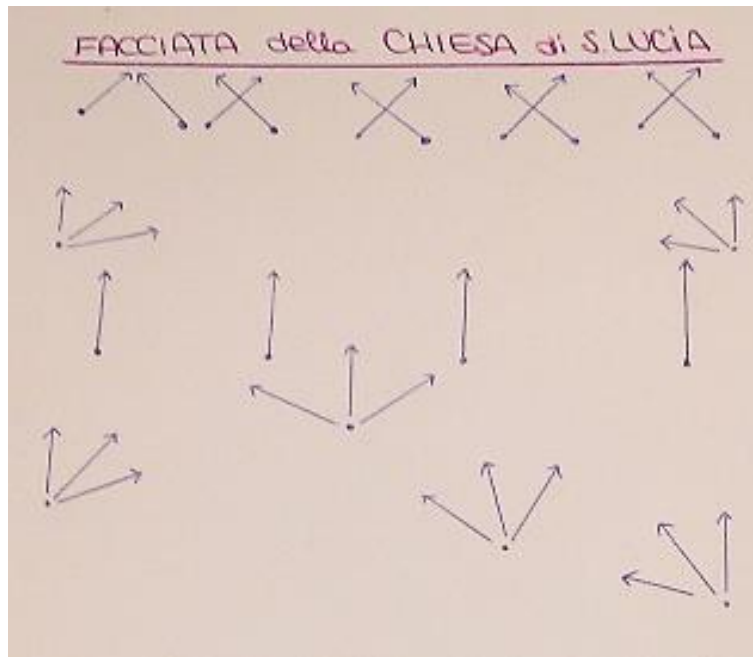


Figura 96: Schema della geometria di presa eseguita da terra. Le frecce indicano dove sono state eseguite le fotografie e in quali direzioni mentre in rosa è mostrata la facciata della chiesa di Santa Lucia.

Per le colonne, poste alla base della facciata, sono state fatte delle fotografie con assi della camera inclinati ma paralleli tra loro, sia da destra che da sinistra, in modo da avere un grande dettaglio per quella parte della chiesa. Infine sono state effettuate delle prese panoramiche, a 360°, in diverse posizioni della piazzetta.

Il materiale di partenza proveniente dalla fase di rilievo fotogrammetrico speditivo è:

- 341 fotogrammi;
- Formato .JPEG di dimensione 3648 x 5472 pixel;
- Focale calibrata 24 mm;
- Dimensione del pixel 6,5 μm .

I 341 fotogrammi sono stati acquisiti in modi differenti, alcune in assetto pseudo normale, altre sono state prese a 360° (panoramica), altre con assi della camera inclinati e paralleli fra loro. Questo è risultato un problema perché l'assetto di presa non è conforme rispetto a quello richiesto dalla fotogrammetria ed in particolare dal software (Figura 97).

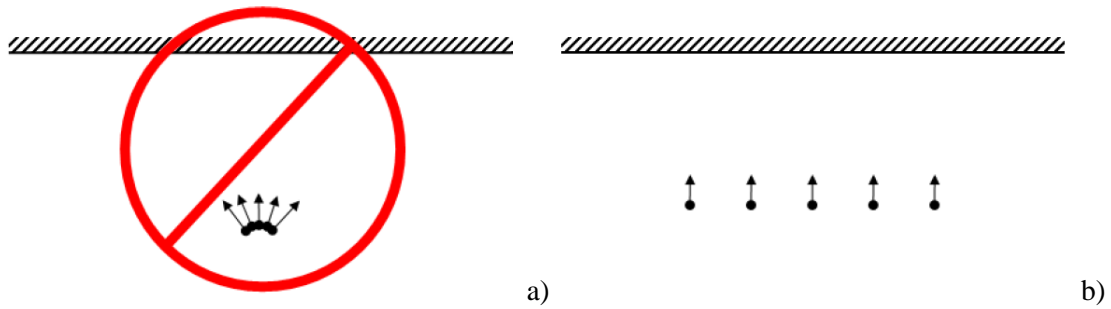


Figura 97: Cattura dei fotogrammi non corretto (a) e corretto (b).

Infine le immagini avevano una sovrapposizione che andava oltre al 90% quindi è stato deciso di eliminare molti fotogrammi. Questo perché la sovrapposizione dei fotogrammi deve essere al massimo dell'80% poiché un'eccessiva sovrapposizione porta, a causa della presenza di immagini eccessivamente simili, alla creazione di "rumore" nell'allineamento dei fotogrammi.

Le immagini scelte sono state eseguite con prese da terra con assetto di tipo normale seguendo quindi le regole della fotogrammetria tradizionale (Figura 98) con assi della camera il più possibile paralleli fra loro e ad una distanza quasi costante rispetto alla facciata e immagini prese ad una distanza ridotta rispetto alla precedente con uno schema di presa mostrato in Figura 99.

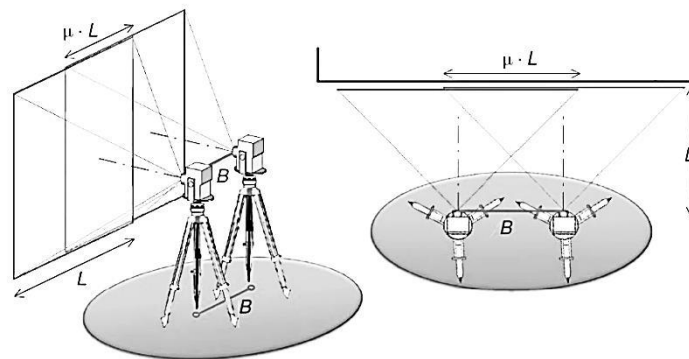


Figura 98: Schema prospettico e planimetrico della presa normale con assi della camera paralleli e perpendicolari alla base di presa.

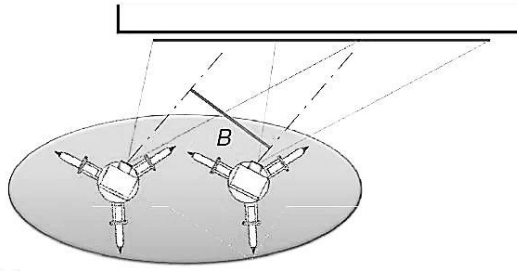


Figura 99: Schema della presa ad assi inclinati e paralleli.

6. PROCEDURA DI ELABORAZIONE DEI DATI LASER

6.1. FASI PRINCIPALI DELL'ANALISI

In conclusione dal capitolo precedente, durante la fase del rilievo con il laser scanner terrestre, sono state effettuate in totale cinque scansioni e sono stati posizionati sette target in modo da ricoprire tutta la scena.

La prima fase di elaborazione dati è la fase di **ALLINEAMENTO** delle nuvole che ha il compito di concatenare le varie scan position, ognuna in un suo sistema di riferimento differente rispetto alle altre.

Le coordinate della nuvola di punti tridimensionale, ottenute con il laser, sono riferite ad un sistema di riferimento che è vincolato dalla posizione e dall'assetto che il laser ha assunto durante la scansione. Nel momento in cui il laser viene spostato in una posizione differente o inclinato, il sistema di riferimento cambia. Quindi nel momento in cui il laser, dopo la prima scansione, viene spostato, la seconda nuvola di punti creata sarà in un sistema di riferimento diverso rispetto alla prima scansione. Nelle due nuvole create l'oggetto scansionato è identico, la scala è quella reale ma i due sistemi di riferimento sono diversi a meno di una rototraslazione nello spazio. Dunque per allineamento delle nuvole si intende portare tutti i punti nello stesso sistema di riferimento.

Per poter effettuare l'allineamento è possibile adottare varie strategie. Una delle più efficaci si basa sull'individuazione nelle varie scansioni dei target retroriflettenti adottati durante la fase del rilievo. Il principio generale del laser utilizzato è che il raggio che raggiunge la superficie dell'oggetto torna indietro e il laser stesso ne misura il tempo intercorso dal segnale per andare e tornare. Essendo che la velocità della luce nel vuoto è nota, tramite una semplice relazione il laser misura la distanza. Il laser manda un

raggio per angoli noti quindi per esempio, parte da una posizione, manda il raggio ad una distanza angolare nota (dall'alto al basso), cioè con un'apertura nota, poi si sposta di un angolo noto (da destra a sinistra). Quindi conoscendo i due angoli e la distanza riesce ad individuare le coordinate X, Y, Z del punto colpito.

Analogamente a quanto avviene in fotogrammetria, il principio dell'allineamento delle nuvole scansionate dal laser è il medesimo cioè in due immagini differenti un determinato punto della scansione 1 corrisponde ad un punto della scansione 2. Avendo le coordinate doppie di questi punti, il laser riesce a calcolare i parametri di rototraslazione che permettono di portare la nuvola 2 sulla nuvola 1 nello stesso sistema di riferimento. Questo è l'allineamento. Quindi, definendo scansione 1 (cioè quella Centrale) come quella di riferimento, vengono portate tutte le nuvole nel sistema di riferimento della scansione 1.

L'uso di target retroriflettenti rendono più precisa e veloce la scansione ma è possibile prelevare anche le coordinate di punti naturali, come, ad esempio, uno spigolo della porta, della finestra, ecc.

In questo rilievo sono stati presi due punti naturali, siccome nella scansione fatta dall'edificio dell'avvocato, i punti che erano sul palazzo dell'avvocato stesso non erano visibili e quelli che erano a disposizione non erano sufficienti.

Rilevate le nuvole di punti con il laser scanner, tramite il software *Riscan Pro*, sono state allineate nello stesso sistema di riferimento. In Figura 100 viene mostrato il progetto originario in cui le scansioni in forma di nuvole di punti non sono ancora allineate.

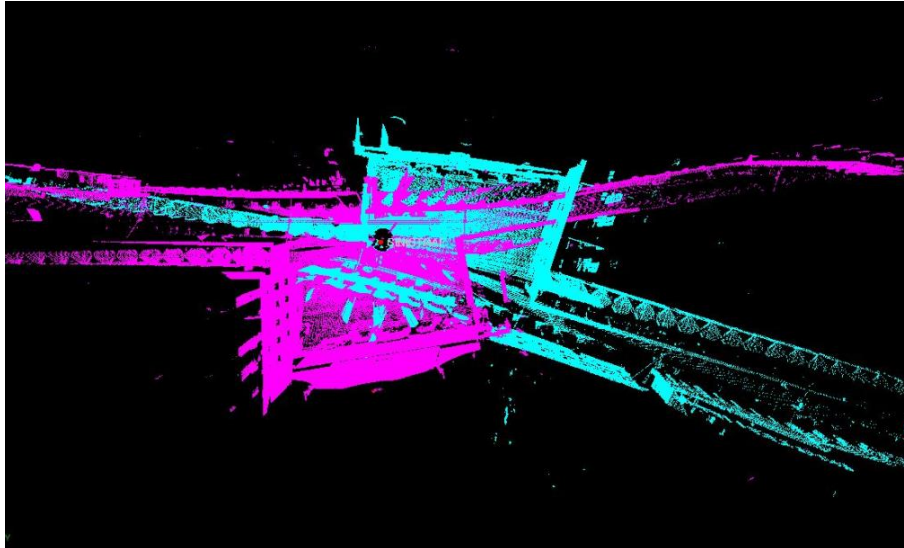


Figura 100: Nuvole disallineate: nuvola scansione centrale in colore magenta e nuvola scansione sinistra in color ciano.

Per poter effettuare l'allineamento delle due nuvole, è stata presa la nuvola centrale come scansione di riferimento. Le coordinate dei target della scansione di sinistra sono state copiate nella scansione di riferimento (Figura 101) e, dopo averle trascinate, con i comandi *File Corrisponding Points* → *Start*, il software calcola i valori di rototraslazione (compare la matrice di rototraslazione spaziale) per portare la Scan Position di sinistra in quella globale (cioè quella centrale) e l'errore, o precisione, in m (Figura 102). La precisione è dell'ordine del mm quindi l'allineamento è stato effettuato con successo in quanto la precisione del laser utilizzato è dello stesso ordine.

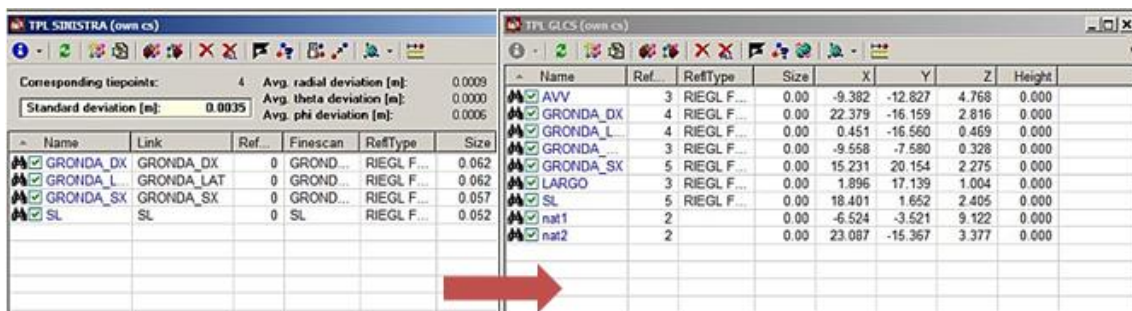


Figura 101: Allineamento delle nuvole con il trascinamento dei target della scansione di sinistra (a sinistra) nella scansione globale (a destra). Oltre ai 7 target c'è la presenza di due punti naturali necessari a causa della scarsa visibilità di alcuni marker.

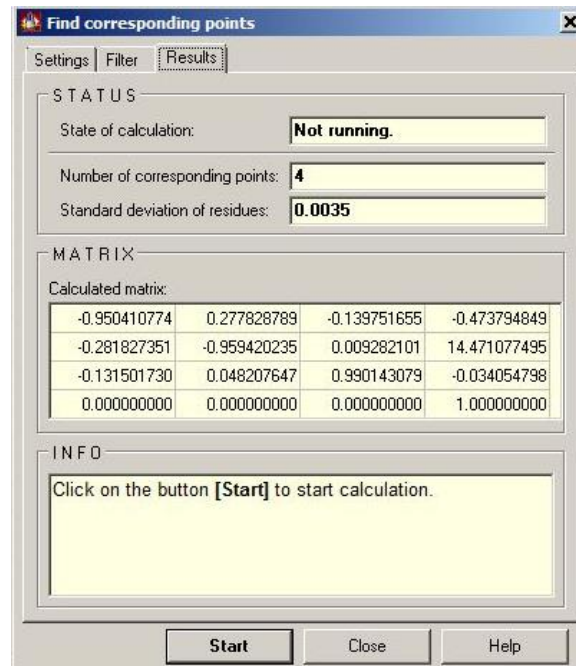


Figura 102: Deviazione standard e matrice di rototraslazione.

Dopo l'allineamento il risultato è quello mostrato in Figura 103. Questa procedura di allineamento è stata effettuata con tutte le nuvole utili, prendendo sempre come riferimento la scansione centrale.

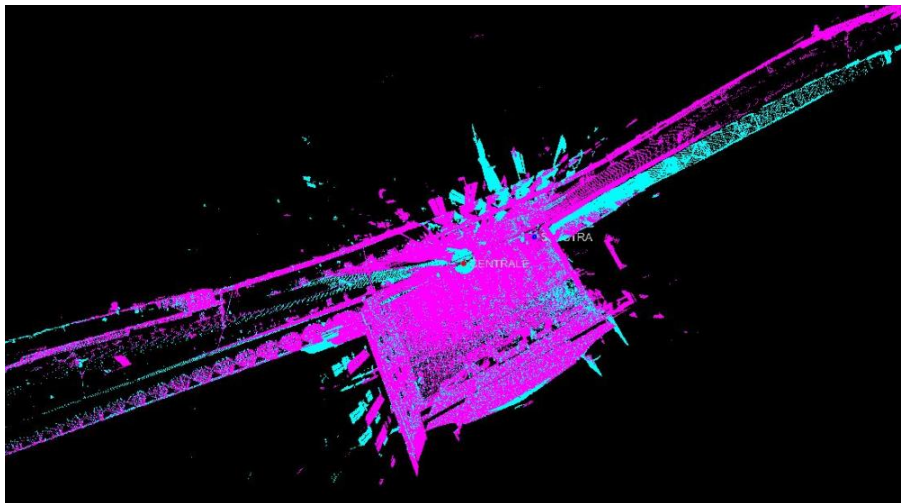


Figura 103: Nuvole allineate.

Dopo l'allineamento, visto che il laser era dotato di una macchina fotografica, il secondo passaggio è quello della **TEXTURIZZAZIONE** della nuvola.

Mentre viene effettuata la scansione, la macchina fotografica scatta delle fotografie; in questo modo si può andare a colorare la nuvola di punti con il dato RGB acquisito con la macchina fotografica.

Le immagini presentano una riga nera sopra e sotto (Figura 104). La presenza della parte nera è dovuta al fatto che la macchina fotografica presenta un angolo di vista minore rispetto a quello del laser, quindi con le foto non viene coperta l'intera porzione che viene scansionata con il laser. Per ovviare a questo problema e avere tutta la facciata colorata è stato necessario fare la scansione anche con l'asse inclinato per avere il dato fotografico anche della parte in sommità della facciata.



Figura 104: Mancanza del dato fotografico.

Perché questo accoppiamento sia immediato, cioè per ogni punto della nuvola corrisponda un pixel dell'immagine, deve essere nota la posizione reciproca tra la posizione del centro del laser e il centro dell'obiettivo della macchina fotografica. Siccome la macchina fotografica viene montata sul laser con un braccio fisso meccanico che si avvita, la posizione reciproca è nota poiché viene calibrata e quindi calcolata una volta per tutte. Viene infatti salvato un file di testo, chiamato mounting, in cui vengono salvati i parametri che definiscono l'accoppiamento, cioè il vettore che nello spazio congiunge il centro del laser con il centro dell'obiettivo. In questo modo è come se si scattassero delle foto con i parametri di orientamento esterni delle immagini noti, quindi, per ogni punto della nuvola si può vedere qual è il pixel dell'immagine che corrisponde al punto della nuvola e li si accoppia. Il mounting viene ricalcolato periodicamente durante la scansione laser in quanto il collegamento tra la macchina fotografica e il laser non è perfetto e la posizione tra i due potrebbe variare leggermente. Questa piccola imperfezione si potrebbe trasformare in un errore in quanto, se non viene ricalcolato periodicamente, quando si va ad accoppiare una foto con la nuvola di punti,

potrebbe succedere che la parte più alta della facciata della chiesa venga colorata con i colori del cielo.

Per poter eseguire questa fase è necessario cliccare con il tasto destro sulla nuvola grezza, cioè non colorata, e utilizzare il comando *Color from Images* per ottenere una nuvola di punti colorata.

Dopo aver allineato e testurizzato le nuvole ottenute tramite le scansioni laser, il terzo passaggio è rappresentato dalla **PULIZIA** delle nuvole, cioè l'eliminazione di tutti quei punti che non interessano la facciata della chiesa. L'eliminazione di elementi estranei deve essere svolta con molta attenzione, verificando che non vengano eliminate, con essi, alcune parti essenziali, eventualità che causerebbe la perdita di vere e proprie informazioni della geometria.

Successivamente viene utilizzato un algoritmo nominato **ICP** (*Iterative Closest Point*) che viene utilizzato per allineare le scansioni non sulla base di punti in comune ma sulla base dell'oggetto desiderato. Questo è un algoritmo automatico che va a riconoscere che quella determinata discontinuità architettonica è la stessa nelle due diverse scansioni e quindi le allinea sulla base delle caratteristiche locali dell'oggetto stesso. In questo caso non sarebbe stato necessario l'utilizzo di tale algoritmo in quanto l'allineamento delle nuvole era già stato eseguito ma, è stato fatto per migliorare la precisione dell'allineamento.

L'ultimo passaggio rimasto prima di ottenere una nuvola definitiva è il **FILTRAGGIO**. Nella facciata si ha della ridondanza di punti, poiché, avendo eseguito cinque scansioni laser, si ha un dato sovrabbondante rispetto a quello che realmente serve. Il filtraggio può essere fatto in due modi: il primo è quello che filtra il 50% dei punti, cioè il programma tiene un punto sì e l'altro no ma, se si ha una zona acquisita da tutte e cinque le scansioni, in quell'area si avrà un punto ogni mm e un'altra zona in cui si avrà un punto ogni 2 mm. quindi facendo questo tipo di filtraggio si continua ad avere una zona più fitta rispetto alle altre.

In questo caso è stato fatto un filtraggio rispetto alla spaziatura dei punti e, come spaziatura è stata data un punto ogni cm. In questo modo la distanza tra i punti in tutta la facciata sarà di 1 cm in modo da andare ad uniformare il dato.

La nuvola densa di punti finale ottenuta con il laser scanner è quella mostrata in Figura 105. I punti presenti con il sistema laser sono 108926419 e le dimensioni dell'oggetto preso in esame sono altezza massima pari a 35,247 m, lunghezza della base pari a 35,8254 m e profondità pari a 6 m.



Figura 105: Nuvola densa di punti ottenuta dal rilievo TLS. Ogni punto restituito è corredato da un valore radiometrico ricavato dalle immagini sincrone acquisite dalla camera digitale montata sopra il Laser. I punti sono definiti in un sistema di coordinate cartesiano ortogonale locale orientato lungo la verticale.

6.2. ESTRAZIONE DEI PFA

La nuvola di punti densa ottenuta attraverso l'elaborazione dei dati TLS è stata utilizzata nel seguito per stimare sperimentalmente l'accuratezza dei prodotti vettoriali ricavati dal rilievo fotogrammetrico. Allo scopo di definire un sistema di riferimento comune, si sono estratti dal modello laser una serie di punti le cui coordinate sono state adottate per "appoggiare" i fotogrammi, ovvero per risolvere i problemi connessi al loro orientamento interno (stima dei parametri caratteristici della camera) ed esterno (posizione spaziale ed assetto delle foto al momento dello scatto).

In primo luogo si è ruotata la nuvola di punti in modo da ottenere un sistema di coordinate di tipo fotogrammetrico, caratterizzato da l'asse X crescente verso destra, l'asse Y lungo la verticale e l'asse Z uscente dall'oggetto.

Per estrarre le coordinate dei PFA dalla nuvola densa di punti ricavata dal rilievo TLS, si è proceduto in questo modo:


- È stato selezionato il tasto  *Add a reference point*;
- Nella schermata, come mostrato in Figura 106, viene selezionato il metodo *Pick Multiple Points*;



Figura 106: Add Reference Point, comando di estrazione delle coordinate di punti dalla nuvola densa in ambiente *Rapidform XOR3 64* (Rapidform website).

- Infine, selezionato il punto di interesse, viene premuto invio per confermare il suo posizionamento e nella parte destra del display compaiono le sue coordinate geometriche locali.

I punti selezionati sono quelli mostrati in Figura 107 e la monografia dei punti è stata riportata nell'Appendice A.



Figura 107: Posizione approssimata dei punti fotogrammetrici di appoggio.

Una volta selezionati i punti di interesse, si inizia con l'elaborazione dei dati fotogrammetrici al fine di ottenere una nuvola di punti densa tridimensionale che rappresenti al meglio la facciata della chiesa.

7. LA RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA AUTOMATICA

In questo capitolo vengono utilizzati due distinti programmi per l'analisi sperimentale, ovvero per la creazione di una nuvola densa di punti georeferenziata e scalata, il primo open source (*Visual SfM*; *VisualSfM website*) e il secondo commerciale a basso costo (*Agisoft Photoscan*; *Agisoft website*). Tutte le elaborazioni sono state eseguite su un'unica workstation con processore dualquadcore Intel(R) Xeon(R) 64-bit e 3.7 GHz, 64 GB di RAM e scheda grafica nVidia Quadro K2200 con memoria grafica dedicata di 4 GB, Windows 7. È bene sottolineare che, nonostante lo studio delle possibilità offerte dai vari software impiegati sia stato quanto più approfondito ed esaustivo, non si può garantire in questa sede di aver individuato e percorso le migliori strategie di calcolo per il caso in analisi. Quanto detto vale specialmente per i software VSfM che offre un vasto numero di possibili parametrizzazioni e che al contempo, oltre ad essere continuamente aggiornato, non possiede una documentazione descrittiva aggiornata e completa. Al contrario le limitazioni dovute al carattere a “scatola chiusa” del software commerciale consente una più agevole scelta del percorso da seguire ma non offre alcun controllo sul processo e nella sua esecuzione; il differente livello di dettaglio della ricostruzione 3D è affidato alla sola scelta di pochissimi elementi mal descritti anche nel manuale di utilizzo del software.

Il blocco della facciata dell'ex chiesa di Santa Lucia è stato ottenuto con la Canon EOS 6D con focale fissa a 24 mm, un sensore CMOS formato 36 x 24 mm (5472 x 3648 pixel) per una risoluzione di 20 Mpixel e dimensione del pixel di 6,5 μm .

7.1 SOFTWARE “LOW COST”

Per la ricostruzione tridimensionale vettoriale e raster della facciata è stato sperimentato un software *Agisoft Photoscan*, largamente impiegato anche in contesti non ingegneristici. Si tratta di un prodotto commerciale a basso costo che esegue l'elaborazione fotogrammetrica automatica di immagini digitali e genera la ricostruzione tridimensionale degli oggetti rappresentati nei fotogrammi impiegando algoritmi di correlazione automatica nati dalla *Computer Vision* e oggi largamente impiegati in campo fotogrammetrico (SfM – *Structure from Motion*).

È un software ad interfaccia grafica sviluppato dalla *Agisoft LLC*, e in questo caso di studio viene utilizzato in ambiente *Windows*, rappresenta a pieno tutti gli step del processo fotogrammetrico e supporta l'*hardware* nell'uso combinato di CPU e GPU.

Photoscan ha diverse applicazioni nel campo dell'ingegneria e poiché può essere utilizzato in ambiente GIS, per la documentazione dei beni culturali e per la produzione di effetti visivi nonché per misure indirette di oggetti di varie scale, è un prodotto intuitivo che può essere gestito da personale esperto e non ed dalla bibliografia si desume che può produrre risultati accurati e di buona qualità.

La *Structure from Motion* si compone nel calcolo delle *feature matching* tra le foto appartenenti al *chunk*, qui rileva i punti nelle immagini rispetto alle variazioni di illuminazione e del punto di vista, generando un *descriptor* per ciascun punto, basato su una regione localizzata attorno ad esso. Per la determinazione delle corrispondenze tra le fotografie viene utilizzato un algoritmo simile allo SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) ed in una fase successiva si effettua la risoluzione dei parametri di orientamento interni ed esterni.

Agisoft Photoscan utilizza un algoritmo “grezzo” per la determinazione del posizionamento approssimato delle camere e poi raffina il calcolo impiegando il *bundle adjustment*. Per la ricostruzione a nuvola densa di punti della superficie, utilizza un approccio a viste multiple con la fusione di mappe di profondità.

Photoscan prevede un filtraggio degli *outlier* che può essere impostato su tre livelli (*moderate, mild, aggressive*) ciascuno da fissare in dipendenza alla regolarità della superficie, indicando quindi la presenza di un fattore di regolarizzazione.

7.1.1. RESTITUZIONE VETTORIALE AUTOMATICA

Per l'elaborazione dei dati fotogrammetrici, sono stati selezionati in totale 59 fotogrammi le cui prese sono state effettuate di fronte alla facciata della chiesa ad una determinata distanza in modo da prendere con tre scatti l'intera facciata da terra fino al tetto (Figura 108), e due prese di dettaglio, una con inclinazione di presa da destra verso sinistra (Figura 109) ed infine una con inclinazione di presa da sinistra verso destra (Figura 110). Successivamente, in Tabella 6 vengono riportati i dettagli del rilievo eseguito.

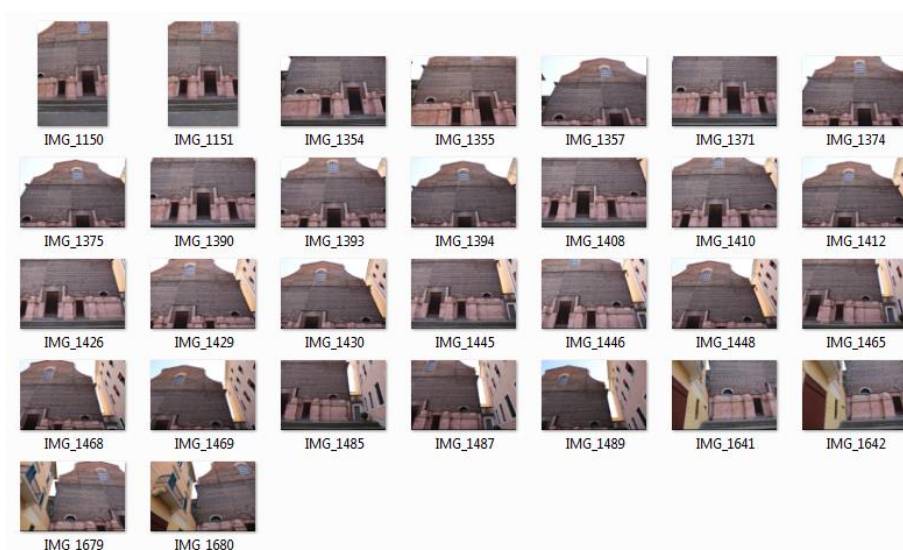


Figura 108: Fotogrammi con presa frontale.

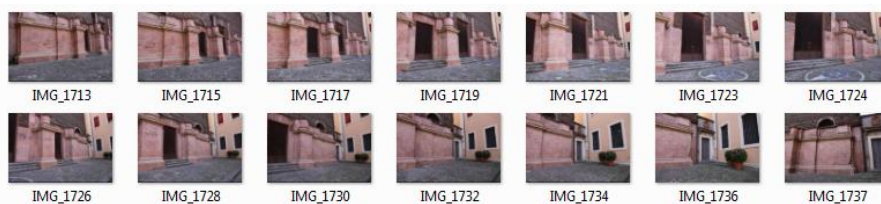


Figura 109: Fotogrammi di dettaglio con presa da sinistra verso destra.

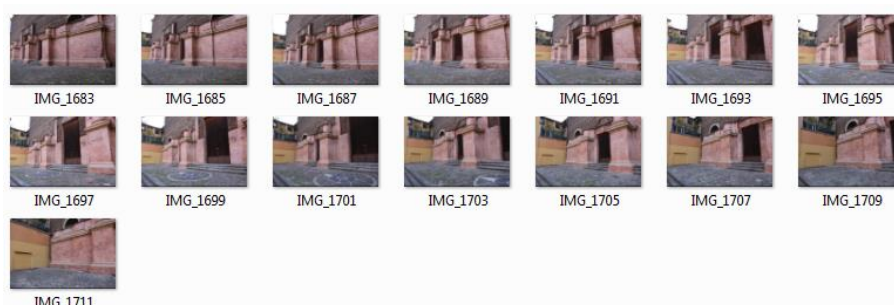


Figura 110: Fotogrammi di dettaglio con presa da destra verso sinistra.

DETTAGLI del RILIEVO	
DISTANZA DI PRESA (Z) alla base della facciata	11,5 m
DISTANZA DI PRESA (Z) nella parte più alta dalla facciata	36,08 m
LUNGHEZZA FOCALE (c)	0,024 m
FATTORE DI SCALA alla base ($mb=Z/c$)	479,17
FATTORE DI SCALA in sommità ($mb=Z/c$)	1503,33
DIMENSIONE PIXEL SENSORE	6,5 μm
GSD (Ground Sample Distance) alla base	0,003 m
GSD (Ground Sample Distance) in sommità	0,01 m
DIMENSIONE FOTO in pixel	3648 x 5472 pixel
DIMENSIONE FOTO in m	0,024 x 0,036 m
FOTOBASE (valore medio)	2,35 m

Tabella 6: Dettagli del rilievo effettuato.

In definitiva la geometria e la distanza di presa considerata in questo studio è quella mostrata in Figura 111.

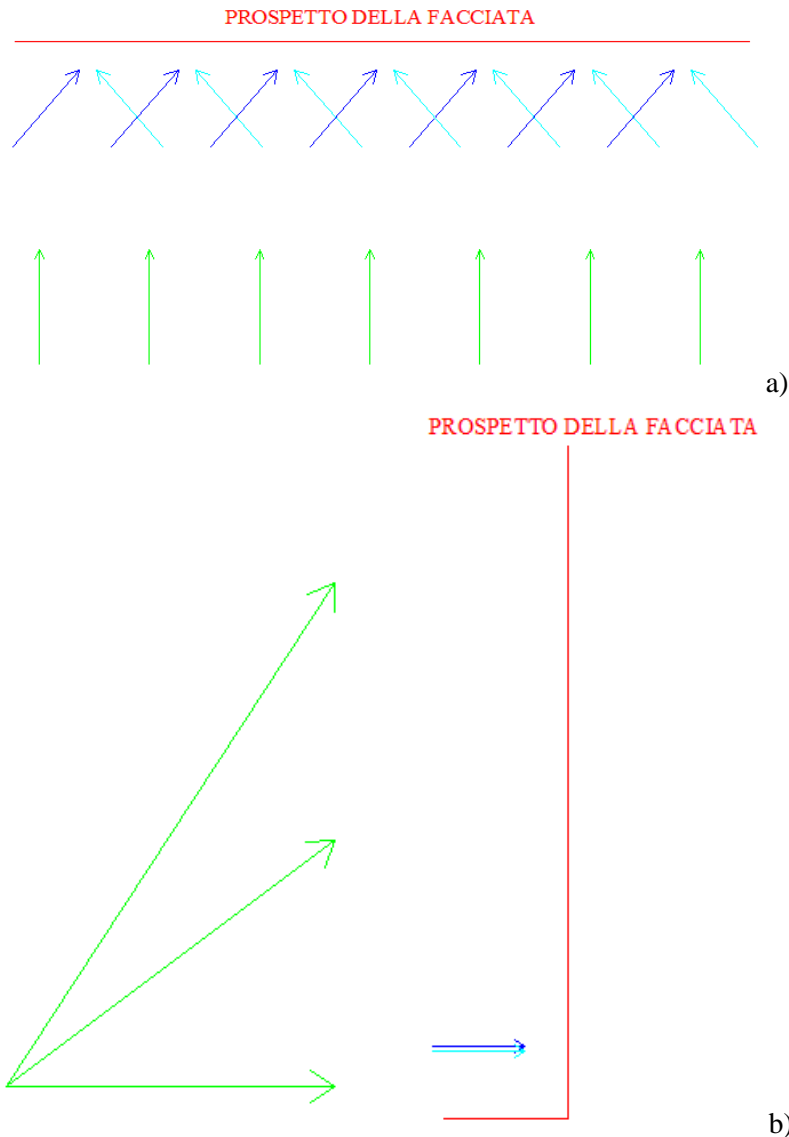






Figura 111: Pianta (a) e prospetto (b) delle posizioni di presa. In verde viene mostrata la presa “frontale”, in blu la presa di “dettaglio da sinistra a destra” e in azzurro la presa di “dettaglio da sinistra a destra”.

Una volta caricate le immagini in un unico chunk, sono state realizzate le *masks*, ovvero immagini che contengono solo l’oggetto di interesse in quanto i fotogrammi di partenza rappresentavano sia la facciata di interesse sia altri oggetti che si potevano eliminare, quali edifici attorno, la piazza e il cielo. Questo metodo viene adottato in quanto, eliminando le porzioni che non sono utili per la creazione del modello 3D, le tempistiche si riducono notevolmente. Per questo motivo, manualmente, immagine per immagine, sono state eliminate tali porzioni.

Per creare una “maschera” il procedimento è il seguente:

- Selezionare l’immagine di riferimento;
- Selezionare i comandi *Intelligent Scissor*  e/o *Magic Wand*  per evidenziare la zona da eliminare;
- Selezionare *Add Selection*  per ritagliare la porzione di immagine che non interessa e selezionando *Show Mask*  nella finestra sotto verranno mostrate le maschere create con il nome dell’immagine di riferimento seguita da “_mask”.

Nella Figura 112 vengono mostrate l’immagine e la sua rispettiva mask. La parte in bianco indica quella porzione che servirà per l’elaborazione della nuvola densa, mentre la parte in nero è la porzione che si è deciso di eliminare.

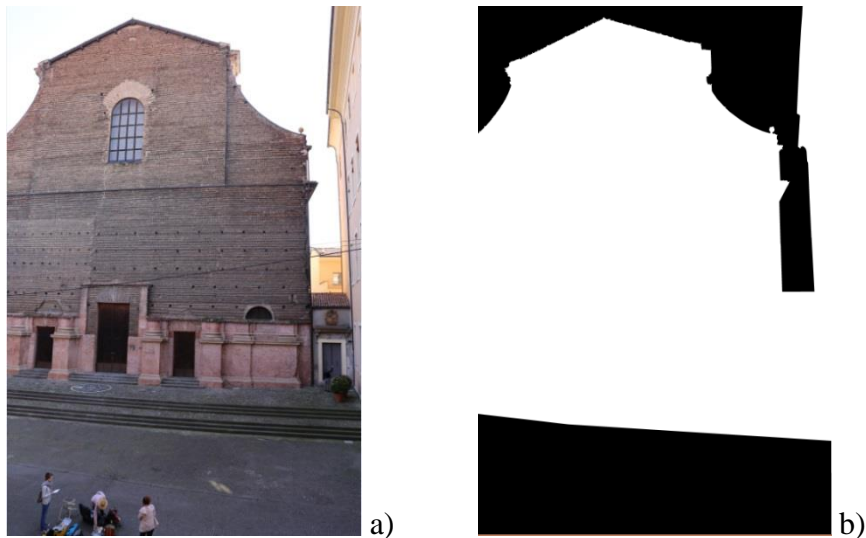


Figura 112: Immagine originale (a) e creazione della sua mask (b)

Per i vari fotogrammi sono state ottenute le maschere mostrate in Figura 113, Figura 114 e in Figura 115.

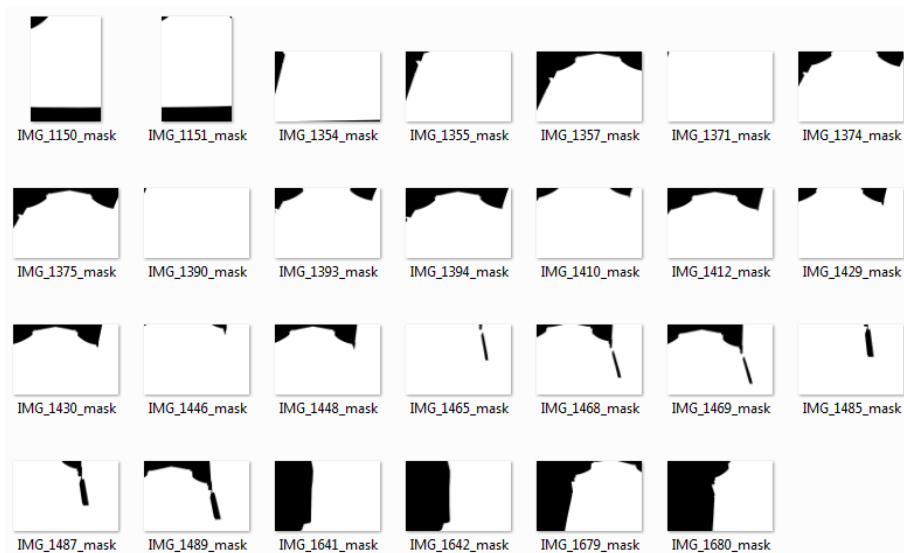


Figura 113: Mask con presa frontale.

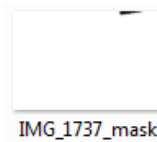


Figura 114: Mask di dettaglio con presa da sinistra verso destra.

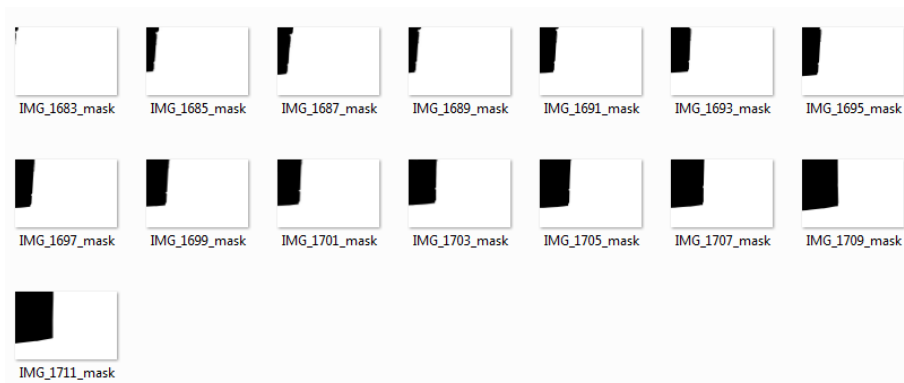



Figura 115: Mask di dettaglio con presa da destra verso sinistra.

Una volta giunti a questo punto è necessario avere a disposizione almeno tre punti fotogrammetrici di appoggio (PFA) per poter georeferenziare la nuvola di punti tridimensionale. Fino ad ora è stato utilizzato la parte *Workspace*, ora si passa alla parte del *Ground Control*.

Primo step da eseguire è impostare il sistema di coordinate. Per fare ciò selezionare il comando *Ground Control Settings*  ed impostare come sistema di coordinate

“sistema di coordinate locali” e come accuratezza del marker 0,005 m in quanto l’accuratezza del laser è di quell’ordine (Figura 116).

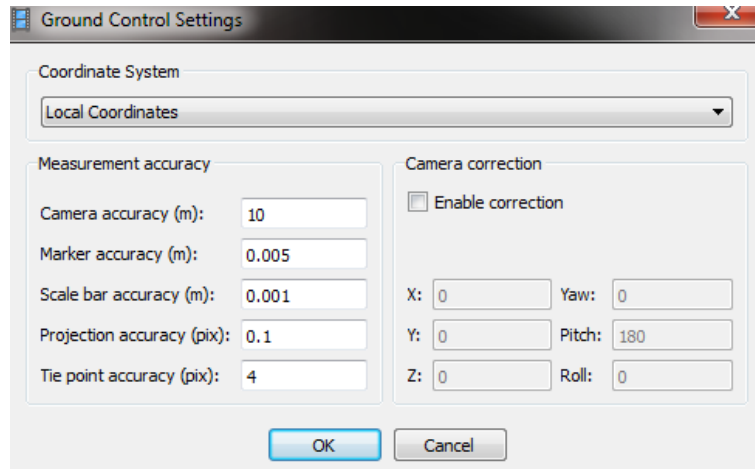


Figura 116: Ground Control Settings.

Ora su ogni fotogramma vengono posizionati i markers, cioè i punti di appoggio, ai quali verranno assegnati le coordinate trovate precedentemente tramite il laser scanner. I marker vengono utilizzati per impostare un sistema di coordinate, per ottimizzare l’allineamento delle foto, misurare distanze e volumi all’interno della scena così come per l’allineamento del blocco basato su di essi. Le posizioni dei marker sono definite dalle loro proiezioni sulle foto di partenza; essi permettono quindi un risultato migliore. Naturalmente per far sì che il sistema sia ridondante è necessario inserire almeno tre punti fotogrammetrici di appoggio.

Successivamente viene effettuato l’allineamento utilizzando il comando *Align Photos*. Tramite questo comando, il programma confronterà i punti comuni nelle diverse fotografie ritrovando la posizione spaziale della macchina fotografica nella ripresa di ogni fotogramma, generando così una nuvola di punti omologhi necessari per la ricostruzione dell’oggetto fotografato. Come si può vedere in Figura 117, si apre una finestra che chiede alcuni parametri per definire l’allineamento: viene richiesto il livello di *Accuracy* e si può scegliere tra Low\Medium\High, in genere si sceglie *High* per ottenere un risultato migliore, il *Pair preselection*, il quale è relativo a grandi insiemi di foto, in questo caso specifico non viene attivato ed infine è necessario spuntare il comando *Constrain features by mask*, in questo modo verranno considerate le masks ovvero solo le porzioni di interesse.

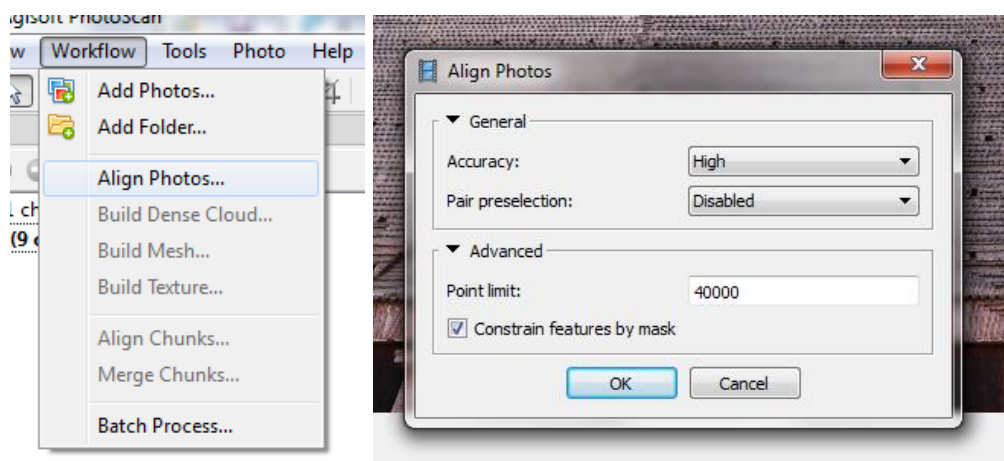




Figura 117: Align Photos.

Concluso il processo di allineamento, prima di verificare l'errore presente, è necessario selezionare il comando *Update*  e, successivamente, il comando *Optimize* .

Punti ed errori ottenuti con il posizionamento dei markers e il successivo allineamento sono quelli mostrati in Tabella 7. In totale sono stati utilizzati 15 markers.

NOME PUNTI	PFA (coord. locali)			RESIDUI
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
2	-14,1637	-7,3013	0,0254	0,028
4	-5,8002	-8,4248	0,4508	0,015
5	-2,6434	-4,8217	0,4512	0,009
6	2,1679	-4,6296	0,4623	0,034
7	5,2413	-8,4308	0,4113	0,039
9	13,5611	-7,2912	0,0002	0,038
11	-16,1214	2,3245	-0,0568	0,026
12	-11,8894	-1,2193	-0,0620	0,067
14	-0,5962	0,3576	-0,0474	0,029
15	7,3451	-1,4596	-0,0709	0,049
17	14,9034	0,3366	-0,0593	0,041
18	-17,3637	9,7698	-0,6605	0,031
29	-9,1412	19,2423	-0,0093	0,015
34	-0,4232	22,9965	-0,3137	0,060
39	8,7509	19,1892	-0,0861	0,040
MEDIA				0,035

Tabella 7: Errore nell'ordine del centimetro fornito da Agisoft Photoscan.

In conclusione sono state utilizzati 59 fotogrammi, 15 punti fotogrammetrici di appoggio e il programma ha creato una nuvola sparsa di 189090 punti (Figura 118) in un tempo macchina di 637,335 secondi.

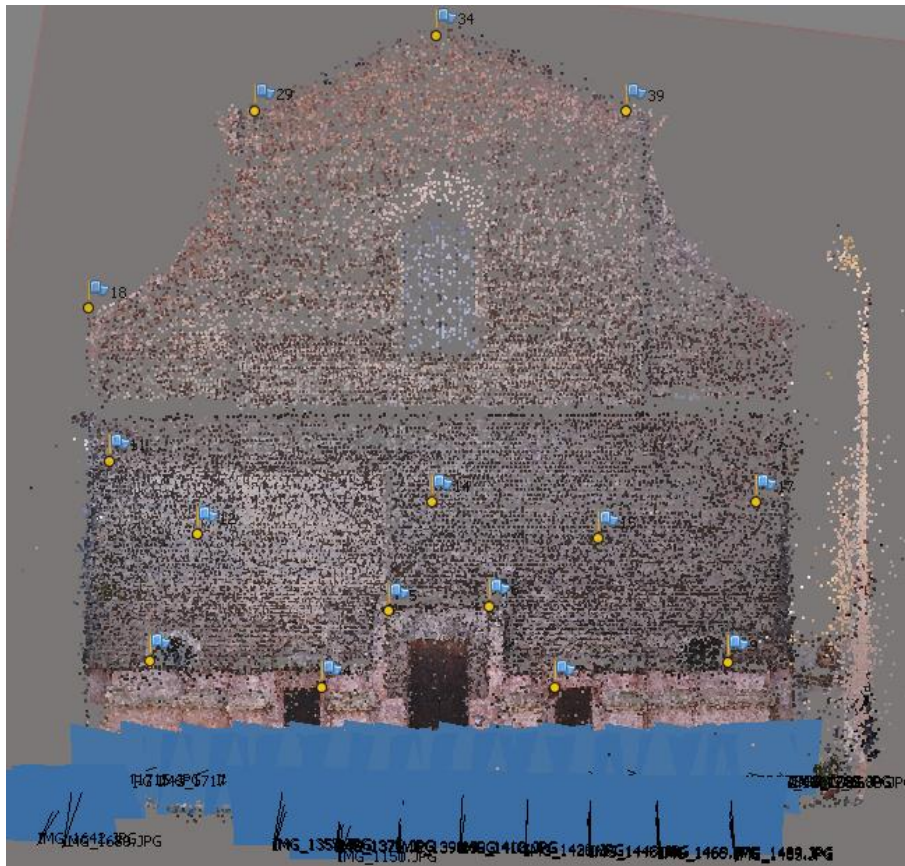


Figura 118: Risultato ottenuto con Align Photos.

Dopo l'allineamento è indispensabile eliminare i possibili valori anomali chiamati *outliers*, ovvero i punti nella nuvola che non sono indispensabili per la creazione del modello e che potrebbero andare a creare degli errori, il risultato è quello mostrato in figura e rappresenta la nuvola sparsa cioè il risultato dell'elaborazione di punti omologhi, e la posizione delle camere per ogni scatto. Per l'eliminazione di tali punti si è proceduto con il comando *Free-Form Selection*, sono stati selezionati i punti ed infine è stato premuto il tasto *Cancel* per rendere definitiva l'eliminazione. Dopo l'eliminazione degli outliers la nuvola di punti ottenuta è mostrata in Figura 119 e il numero di punti è leggermente diminuito passando a 174248 punti.

Dalle immagini mostrate in Figura 120 e Figura 121 si denota fin da subito che la densità dei punti è maggiore alla base rispetto alla sommità. Questo è causato dalla distanza e dalla geometria di presa che è stata effettuata da terra.

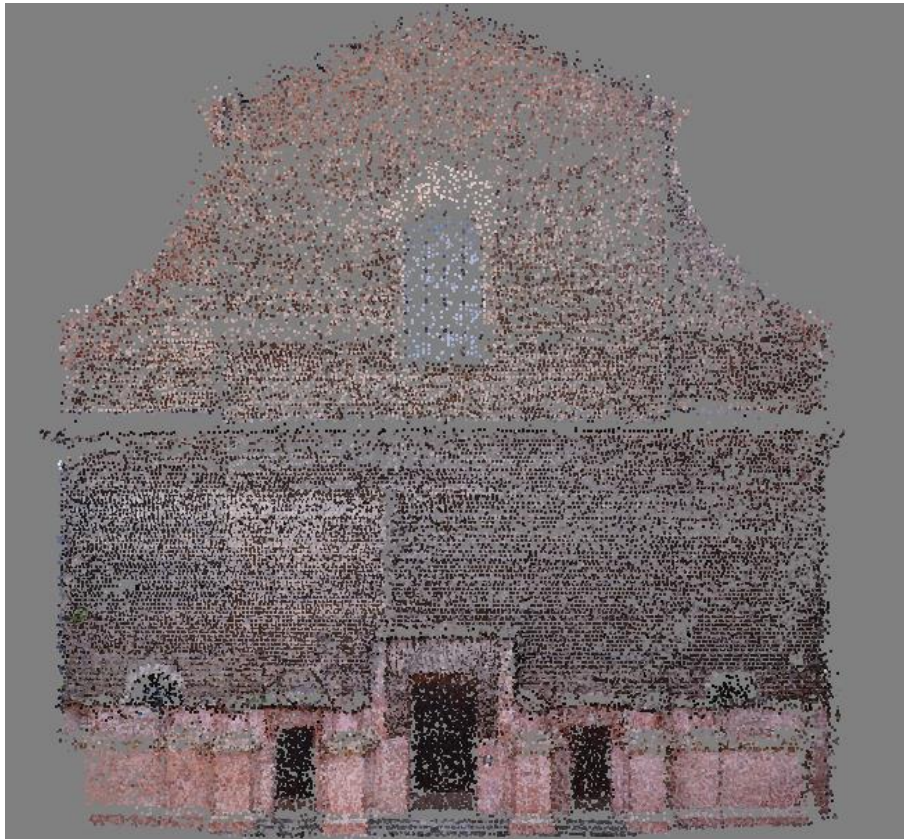


Figura 119: Nuvola sparsa dell'intera facciata.

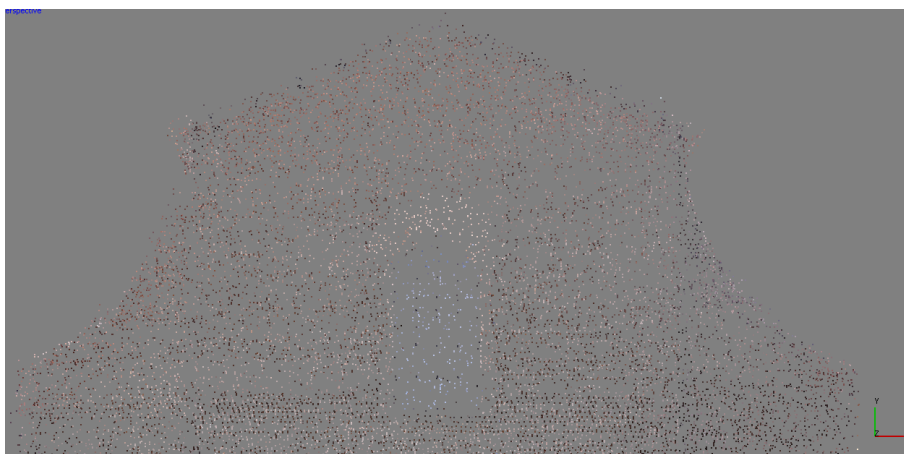


Figura 120: Nuvola sparsa della sommità della chiesa.

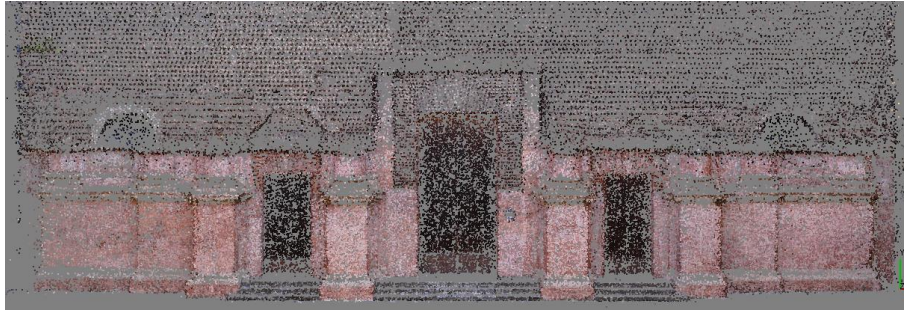


Figura 121: Nuvola sparsa della base della chiesa.

Ora si procede con il processo di densificazione della nuvola di punti con il comando *Build Dense Cloud*. Tramite questo comando, il programma genererà una nuvola di punti a partire dalle immagini allineate. Questi punti colorizzati sono omologhi tra i fotogrammi e orientati nello spazio.

Dopo tale selezione, si apre una finestra e come accuratezza viene sempre selezionato *High* e come Depth filtering viene selezionato *Aggressive*. Questo filtro comporta una riduzione del rumore e un risultato esteticamente più accettabile ma potrebbe provocarmi il cambiamento o addirittura l'eliminazione di alcuni dati (Figura 122).

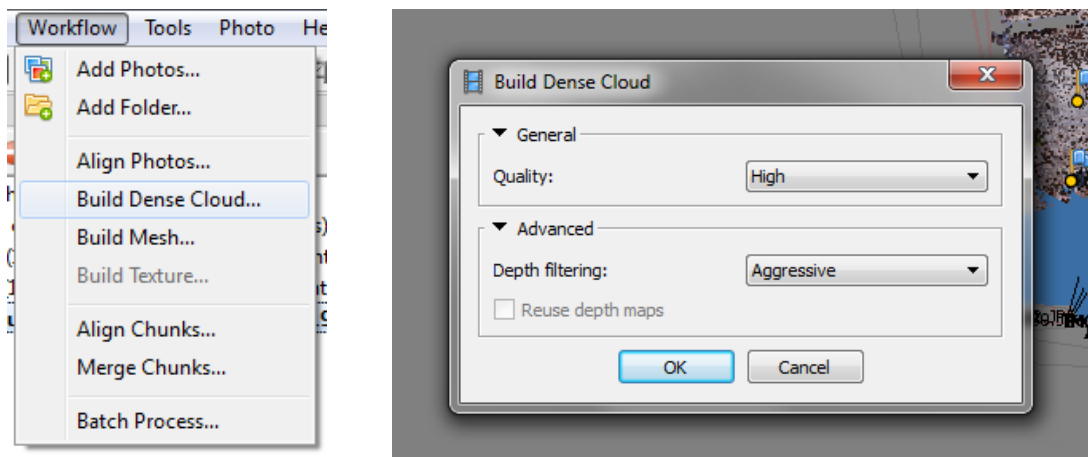


Figura 122: Build Dense Cloud.

Il tempo impegnato per tale operazione è pari a 30898,75 secondi (pari a circa 8,5 ore) e il numero di punti è aumentato passando a 22747195 punti.

Il risultato ottenuto è quello mostrato in Figura 123.

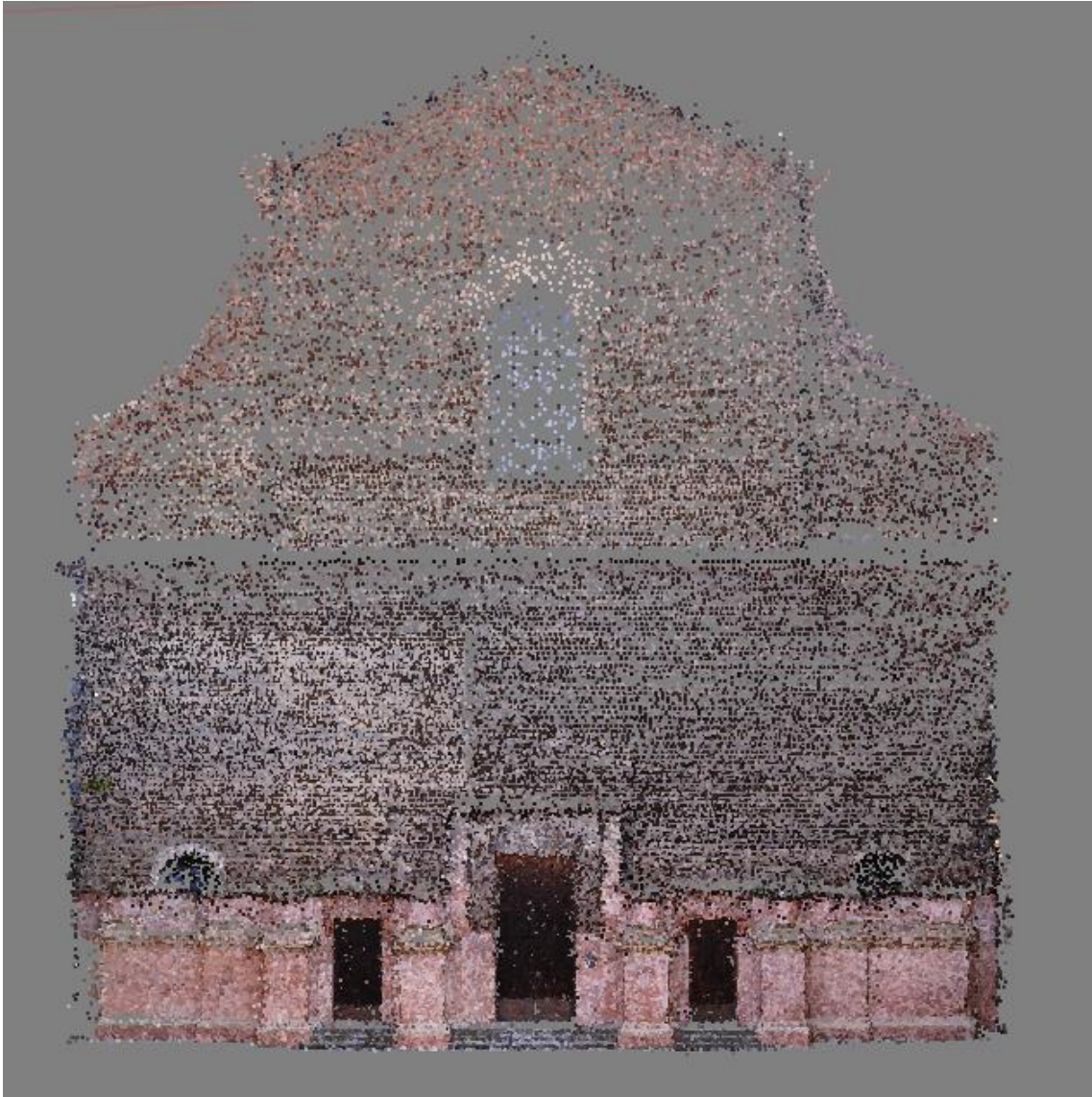


Figura 123: Nuvola densificata

Una volta densificata la nuvola, si vuole creare una superficie che permetta una visualizzazione migliore dell'oggetto 3D, per cui viene utilizzando il comando *Buid Mesh* nella sezione Workflow ed imposto i valori mostrati in Figura 124 per ottenere un risultato di buona qualità.

Attraverso questo comando il programma ricostruisce una mesh poligonale tridimensionale che rappresenta la superficie dell'oggetto fotografico basandosi sulla nuvola di punti. In questa fase viene utilizzato l'algoritmo *Arbitrary* per generare la mesh di un oggetto non bidimensionale.

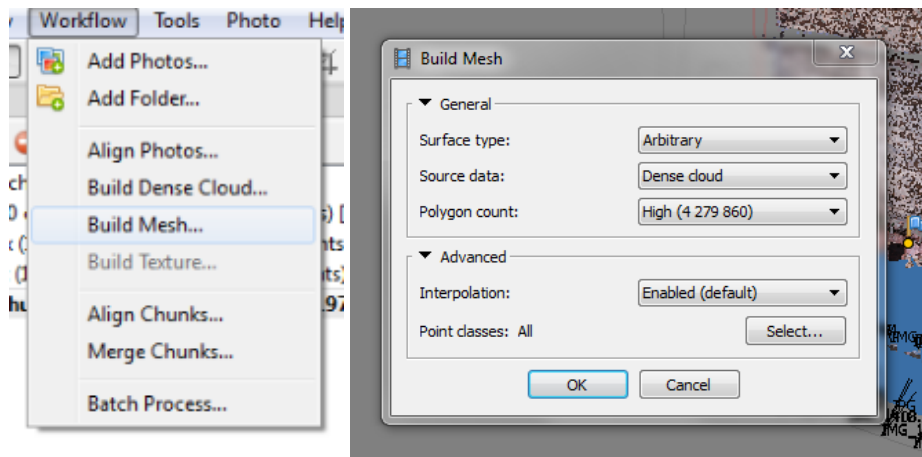


Figura 124: Build Mesh.

Il processo è durato 856,518 secondi e i punti sono diventati 4549432 e il risultato finale è quello mostrato in Figura 125, Figura 126 e Figura 127.



Figura 125: Nuvola densa della facciata in prospettiva.



Figura 126: Vista centrale della facciata



Figura 127: Dettaglio della parte inferiore della facciata.

Dopo l'eliminazione di porzioni della facciata che non erano di interesse per lo studio della stessa, il risultato è quello mostrato in Figura 128 e il numero di punti è diminuito a 3455549 punti.



Figura 128: Nuvola densa del prospetto frontale della facciata.

Creata la mesh, continua l'elaborazione applicando la texture sui punti, scegliendo le azioni dalla stessa tendina utilizzata finora, cioè seguendo la sequenza di caricamento che è partita con *Align Photos*; man mano si attivano tutte le procedure per arrivare alla creazione della mesh texturizzata.

Quindi sempre dal comando *Workflow*, viene selezionato *Build Texture*. Grazie a questo comando il programma genererà una texture descrittiva delle qualità materiche dell'oggetto e sarà possibile esportare ortofoto dell'oggetto secondo viste orientate (Figura 129).

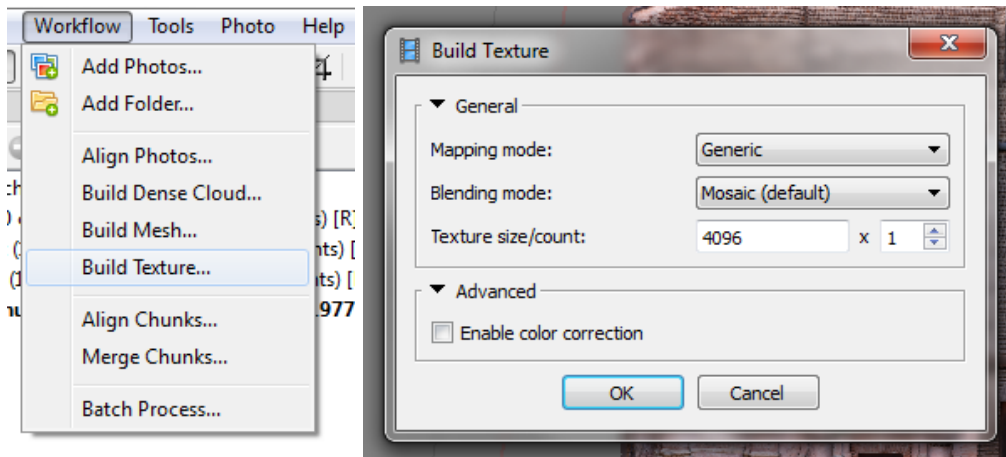


Figura 129: Build Texture.

Tale processo è durato 114,893 secondi, i punti sono rimasti invariati e il risultato finale è quello mostrato in Figura 130, Figura 131 e Figura 132.



Figura 130: Nuvola densa texturizzata.



Figura 131: Dettaglio della facciata alla base.



Figura 132: Dettaglio del portone principale texturizzato.

In totale il tempo impiegato dalla macchina per generare una nuvola di punti densa e georeferenziata nello spazio è di circa 9 ore.

Infine è stata esportata la nuvola di punti dal software Agisoft PhotoScan, per eseguire lo studio geometrico del modello ottenuto, in un altro ambiente software, di tipo *open*

source (*CloudCompare*). Per fare questo, mediante il comando *Export Points*, si è optato per il formato standard .LAS (Figura 133). Si tratta di un formato binario che memorizza tutte le informazioni contenute in una nuvola di punti 3D in una forma relativamente compatta.

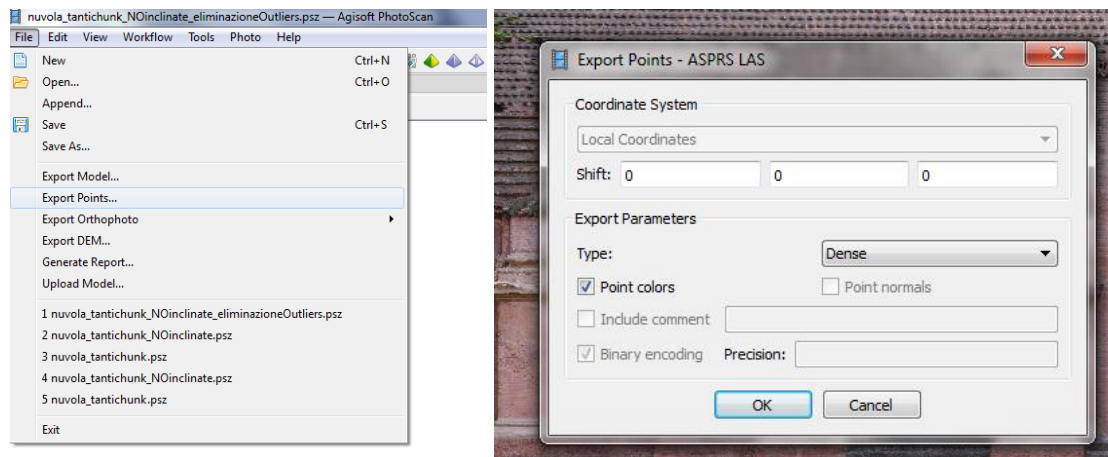


Figura 133: Esportazione dei punti della nuvola densa.

7.1.2 CREAZIONE DELL'ORTOFOTO

Una ortofotografia è una fotografia che è stata geometricamente corretta e georeferenziata (ortorettificata), in modo tale che la scala della fotografia sia uniforme ed essa abbia un contenuto metrico: la foto può così essere considerata equivalente ad una mappa, e su di essa possono essere eseguite delle misure.

L'ortofoto, tramite Agisoft, è creata rapidamente attraverso il comando *Export Orthophoto* e viene esportata in formato .JPEG/.PNG/.TIFF. Successivamente si è aperta un'ulteriore finestra in cui verranno richieste delle caratteristiche. Il tipo di progetto è di tipo *TOP XY*, la dimensione del pixel è stata modificata a 0,005 mm, è stato spuntato il *Setup boundaries*, ovvero la regione di interesse, ed infine è stato spuntato il comando *Write Word File* per ottenere un file in formato testo associato all'immagine nel quale sono scritti i parametri di georeferenziazione dell'immagine stessa. Esso contiene 6 righe: la dimensione del pixel in X e in Y, due parametri di rotazione che solitamente sono circa pari a zero ed infine le coordinate X e Y del primo pixel in altro a sinistra (Figura 134). Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 135.

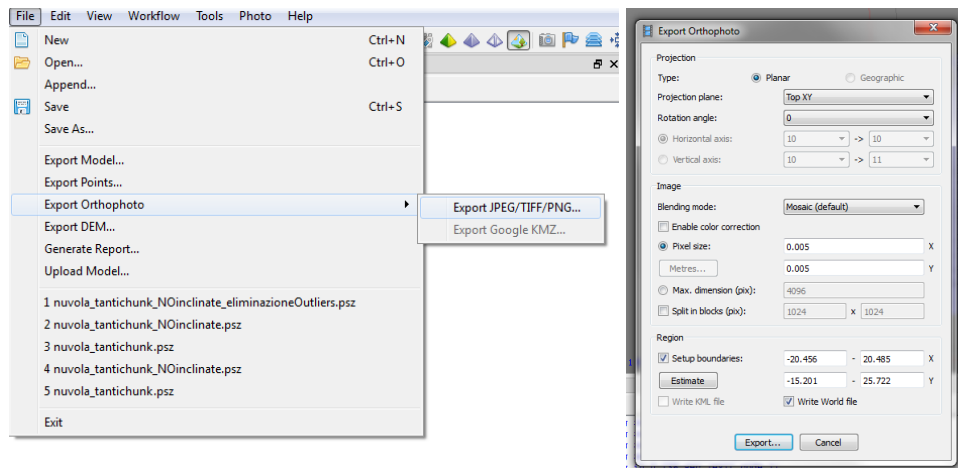


Figura 134: Generazione di un'ortofoto.



Figura 135: Creazione dell'ortofoto, cioè una fotografia geometricamente corretta e georeferenziata, tramite Agisoft Photoscan.

7.2 SOFTWARE OPEN SOURCE

VisualSfM è un programma open source ad interfaccia grafica per la ricostruzione di nuvole sparse di punti tridimensionali usando la *SfM* (Structure from Motion) e rispondente ai criteri e alle richieste del mondo della Computer Vision. Questo programma è stato sviluppato da Changchang Wu, attualmente software engineer di Google ([VisualSfM website](#)).

Il software inizialmente era nato in ambiente Windows ma successivamente è stato consentito l'uso in ambienti di esecuzione diversi da quello originale, quali i sistemi Linux-based e Mac OSX da parte di sviluppatori terzi.

Il processo di ricostruzione della scena tridimensionale è articolato in diversi *steps*. L'estrazione e il *matching* delle *feature* sono attuati tramite un'implementazione al calcolo su GPU del SIFT. Triangolazione e *bundle adjustment* sono invece basati su un algoritmo di compensazione multicore (parallelizzato) tra CPU e GPU grazie alle librerie OpenGL e CUDA. Qualora non si disponesse di schede grafiche che supportano tali librerie il calcolo può essere eseguito semplicemente sul processore esautorando però il software dal suo pregio principale: la rapidità.

Nella fase di PBA è da sottolineare che i parametri interni della camera utilizzata non sono mantenuti costanti ma valutati in modo differente per ogni singola presa e il modello di distorsione è particolarmente semplificato in quanto adotta un solo parametro per la distorsione radiale, per un totale di 4 POI. La normalizzazione viene effettuata rispetto al quadrato della focale stimata in mm.

7.2.1 LA PROCEDURA PER OTTENERE UNA NUVOLA DI PUNTI GEOREFERENZIATA E SCALATA

La procedura adottata con questo tipo di programma è la seguente:

- Utilizzare la stessa mole di fotogrammi utilizzati tramite Agisoft.
- Fare due tipi di prove:
 - La prima consiste ad eseguire la restituzione in automatico utilizzando le stesse immagini trattate con Agisoft con lo scopo di confrontare le performance dei due diversi software.
 - La seconda, invece, consiste nell'utilizzare gli stessi fotogrammi ma rettificati, cioè dotati già di parametri di orientamento interno, tramite una calibrazione delle immagini realizzata in laboratorio.

La seconda scelta viene effettuata in quanto VisualSfM non mantiene costanti i parametri interni della camera ma essi vengono valutati differenzialmente ad ogni singola presa ed infine il modello di distorsione impiegato è alquanto semplificato poiché adotta un solo parametro per la correzione della distorsione radiale cioè k_1 del modello di Brown. Le deformazioni radiali r possono essere corrette in base al modello di Brown (1966). Esso è di fondamentale importanza in quanto all'atto della presa l'obiettivo induce una distorsione sull'immagine prevalentemente radiale che deve essere trattata. Le componenti di errore sistematico sono modellabili mediante funzioni polinomiali e al modello delle equazioni di collinearità vanno aggiunti 5 parametri che definiscono le funzioni polinomiali di distorsione (k_1, k_2, k_3, p_1, p_2).

Le coordinate immagine corrette dagli effetti sistematici indotti dalle distorsioni radiali e tangenziali si ottengono dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x &= \hat{x} + dx_r + dx_t \\y &= \hat{y} + dy_r + dy_t\end{aligned}\tag{1}$$

Dove:

x, y le coordinate corrette dagli effetti sistematici indotti dalle distorsioni radiali e tangenziali;

\hat{x}, \hat{y} le coordinate affette dagli errori legati alle distorsioni delle lenti;

dx_r, dy_r gli errori prodotti dalle distorsioni radiali;

dx_t, dy_t gli errori prodotti dalle distorsioni tangenziali.

Le distorsioni radiali r possono dunque essere corrette in base al modello di Brown:

$$dr = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (2)$$

Dove r è la distanza radiale tra il punto immagine e il Punto di Migliore Simmetria e k_1, k_2, k_3 sono i parametri di distorsione radiale delle lenti.

- **IMMAGINI NON RETTIFICATE**

I comandi che devono essere utilizzati per la creazione della nuvola densa sono fondamentalmente quattro e vengono mostrati in Tabella 8.





FASI DI UTILIZZO DEI COMANDI	ICONA	DENOMINAZIONE	DESCRIZIONE
1°		Add Some Image	Aggiungere immagini nella workspace
2°		Match the Images	Lanciare la ricerca delle feature e la corrispondenza tra coppie di immagini
3°		Sparse Reconstruction	Lanciare la ricostruzione sparsa
4°		Dense Reconstruction	Lanciare la ricostruzione densa usando CMVS/PMVS di Yasutaka Furukawa

Tabella 8: Comandi principali di VisualSfM.

Nella prima fase devono essere selezionate le foto da inserire, che il programma dovrà quindi processare per arrivare alla realizzazione di un modello denso.

Le foto devono essere realizzate con tipologia di presa il più possibile normale, con assi paralleli tra loro. È opportuno che le strisciate di fotogrammi analizzati non abbiano assi della camera ortogonali tra loro, altrimenti occorrerà suddividere il processo.

Prima di iniziare queste fasi è necessario cambiare un parametro imposto dal programma in quanto le fotografie hanno un'alta definizione, quindi sono molto pesanti (circa 8 MB) ed hanno un formato superiore rispetto a quello standard (5472 x 3648).

Per questo motivo è stato cambiato un parametro del software per consentire di trattare fotogrammi ad alta risoluzione. In Figura 136 viene mostrato come risolvere questo errore. Quindi, seguendo il procedimento consigliato, è stato utilizzato il comando *Tolls* → *Enable GPU* → *Set maximum DIM* → aumento il valore concesso di default da 3200 a 4096.

```
Something to watch out for high resolution images (when using SiftGPU)
There is an important (modifiable) parameter for SiftGPU feature detection.
    maximum_working_dimension = 3200 by default.

Given an image of size d = max(w, h), Lowe's original SIFT detection starts with the up-sampled
image of sz = 2 * d. SiftGPU actually starts the detection with size
    sz' = max{sz/2^i | sz/2^i <= maximum_working_dimension, integer i >= 0};
For example, if your image size is 1024, 1600, 2048, 3200, 4000, the corresponding sizes after
the adjustment are 2048, 3200, 2048, 3200, 2000 respectively.

This is usually not a problem. Sometimes you want to get more features for better result, so
you may not want size 4000 reduced to 2000. In such cases, you can do the following:

1. If you are sure you have enough memory for size 4000,
    you should change the parameter by "Tools -> Enable GPU -> Set Maximum DIM"

2. Resize your input images to size 3200

In addition, SiftGPU may down-sample again according to the available GPU memory, which may
cause undesired behaviors on small GPU memory. Check here.
```

Figura 136: Errore di VisualSfM con l'utilizzo di fotogrammi ad alta definizione (VisualSfM website).

Successivamente il comando utilizzato per caricare le immagini (Figura 137) è *Open Multi Images* e, per ogni immagine, viene letta la risoluzione dell'immagine e la sua lunghezza focale espresse in pixel nella *Task Viewer* (Figura 138).

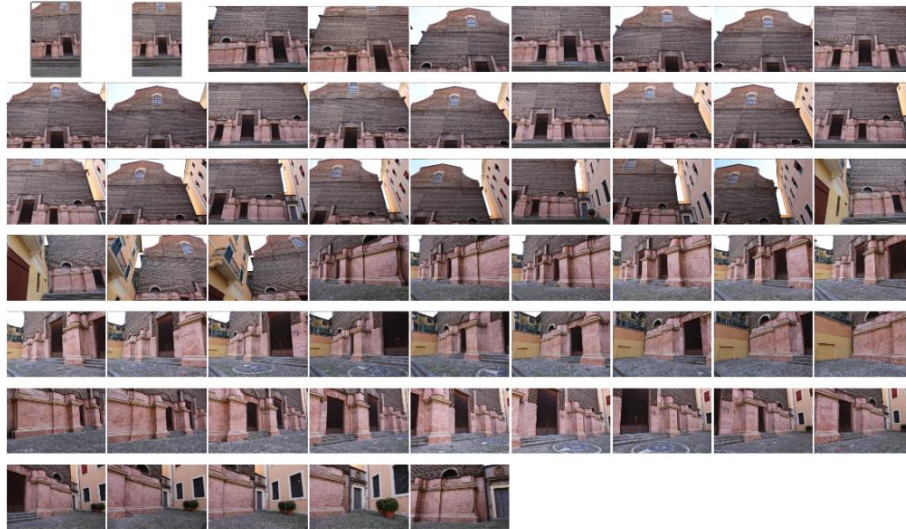


Figura 137: Immagini utilizzate.

```

IMG_1150
image_size:    3648x5472
focal_length:  3603.063

```

Figura 138: Lettura dell'immagine caricata.

La seconda fase riguarda l'utilizzo del comando *Compute Missing Matches* per eseguire l'estrazione di caratteristiche e una ricerca di corrispondenze presunte su tutte le coppie di fotogrammi (Figura 139).

```

0000 and 0001: 5305 matches, 0.48sec, #0
0000 and 0001: E[4341/5305], H[877], 0.07sec
0000 and 0003: 3574 matches, 0.72sec, #2
0001 and 0002: 4069 matches, 0.83sec, #1
0000 and 0003: F[2030/3574], H[286], 0.13sec
0001 and 0002: E[2255/4069], H[203], 0.04sec
0000 and 0002: 3110 matches, 0.35sec, #0
0000 and 0002: E[2288/3110], H[606], 0.02sec
0002 and 0007: 2991 matches, 0.38sec, #0
0002 and 0007: E[1511/2991], H[148], 0.06sec
0001 and 0003: 3769 matches, 0.81sec, #2
0003 and 0007: 3803 matches, 0.34sec, #0

```

Figura 139: Confronto tra fotogrammi per la ricerca di corrispondenze.

I file di testo che contengono i *SIFT* descrittori vengono salvati in automatico nella cartella dalla quale le immagini sono state caricate; anche i file *.mat*, che sono il risultato del feature matching, si trovano in questa cartella (Figura 140).

```

Note some octaves may be automatically skipped
SIFT: 0000, 3648x5472, 8458, 0.48sec
SIFT: 0001, 3648x5472, 8807, 0.19sec
SIFT: 0002, 5472x3648, 12066, 0.42sec
SIFT: 0003, 5472x3648, 9714, 0.21sec
SIFT: 0004, 5472x3648, 9143, 0.19sec
SIFT: 0005, 5472x3648, 11877, 0.24sec

```

Figura 140: File SIFT.

A questo punto si cerca di ottenere una ricostruzione sparsa della nuvola di punti tramite *Compute 3D Reconstruction*. Questa si genera in modo continuo e viene direttamente visualizzato nel work-space. Viene effettuata la triangolazione e il Bundle Adjustment (PBA) e a questo punto si potrebbe effettuare un primo salvataggio della nuvola in formato .nvm o .ply (Figura 141). Il formato .ply è stato principalmente progettato per memorizzare dati tridimensionali da scanner 3D. Il formato di memorizzazione dati supporta una descrizione relativamente semplice del un singolo oggetto come una lista di poligoni nominalmente piani. Una varietà di proprietà possono essere memorizzate come il colore e la trasparenza, normali alla superficie, le coordinate della texture e valori di confidenza dei dati. Ci sono due versioni del formato di file: uno in ASCII, l'altro in binario.

```

Run full 3D reconstruction, begin...

Initialize with IMG_1371 and IMG_1374
1656 3D points initialized from two images
PBA library version = 105
PBA: 1656 3D pts, 2(-0) cams and 3312 projs...
PBA: 0.147 -> 0.054 (1 LMs in 0.01sec)
Focal Length : [3603.063]->[3605.363]
Focal Length : [3603.063]->[3606.420]

#####
#3: [IMG_1354] sees 2145 (+4136) 3D points
Focal Length in EXIF [3603.063]
Estimated Focal Length [3603][0.66W]
NOTE: inlier ratio 48%, 61%
# 678 projs (0 pts and 0 merges)
PBA: 1656 3D pts, 3(-0) cams and 3990 projs...
PBA: 10.705 -> 0.235 (10 LMs in 0.08sec)
#new points removed : 614
#unstable points removed : 614

*****
#3/3: 3973 proj, 1430 pts, 0M, 0UP, 0s
PBA: 2472 3D pts, 3(-0) cams and 6057 projs...
PBA: 4.252 -> 2.242 (38 LMs in 0.32sec)
PBA: 2472 3D pts, 3(-0) cams and 6057 projs...
PBA: 2.242 -> 2.242 (6 LMs in 0.04sec)
Focal Length : [3603.063]->[17830.215]
Radial Distortion : [4.433 -> 285]

```

Figura 141: Ricostruzione sparsa attraverso la triangolazione e il Bundle Adjustment.

In questa fase il programma cerca di dare un orientamento ad ogni fotogramma considerando la focale, la distanza di presa e l'assetto di ogni fotogramma, in modo tale da ricostruire la scena (Figura 142).



Figura 142: Ricostruzione automatica della struttura della scena. Viene ricostruita la geometria di presa e viene mostrato che le immagini sono state prese a distanza diversa.

Infine, come ultima fase, per la ricostruzione densa, viene utilizzato il comando *Run Dense Reconstruction*.

Per questa parte finale vengono utilizzati CMVS/PMVS2 scritti da Yasutaka Furukawa. CMVS, acronimo di *Clustering Views for Multi-view Stereo*, prende il prodotto di un software SfM come input, e ne scompone le immagini in blocchi di dimensioni gestibili. Un software MVS può essere usato per processare ogni cluster in modo indipendente ma parallelamente, e in modo tale che non avvenga la perdita di dati ottenibile dall'intero set di immagini. Questo software è accoppiato a PMVS2. PMVS2, acronimo di *Patch-based Multi-view Stereo Software versione 2*, è il vero *dense matcher*. Prende un blocco di immagini e i parametri della camera, per poi ricostruire la struttura tridimensionale di un oggetto visibile nelle immagini. Il software in automatico restituisce la sola struttura rigida, ossia ignora oggetti come pedoni o parti vegetali quali alberi in quanto particolari non coerenti in immagini consecutive. In output si ottengono

una serie di punti orientati, dove le coordinate tridimensionali e la normale alla superficie sono stimati per ogni punto orientato.

Il risultato ottenuto con la ricostruzione della nuvola densa di punti è quello mostrato in Figura 143.

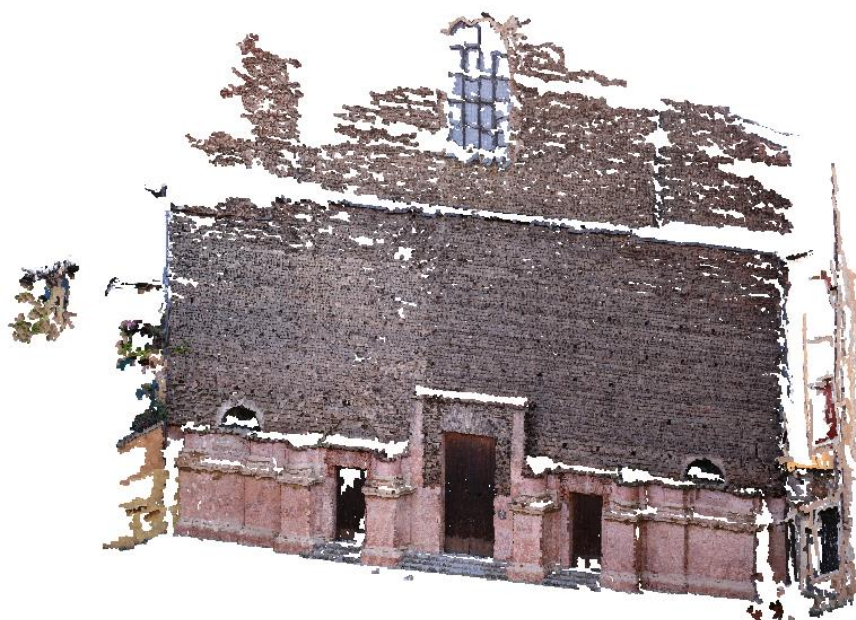


Figura 143: Visualizzazione tridimensionale densa.

Il tempo utilizzato per la creazione della nuvola densa è stato quello mostrato in Tabella 9 per un totale di circa 35 minuti.





COMANDO	TEMPO IMPIEGATO
	36 secondi
	414 secondi
	61 secondi
	26,433 minuti

Tabella 9: Tempo impiegato.

Il risultato ottenuto con le immagini non rettificate, cioè non dotate di parametri di orientamento interno è stato alquanto insoddisfacente in quanto è stata restituita

solamente la nuvola di punti alla base della facciata. Si è notato che il numero di punti restituiti con Visual SfM era insufficiente per rappresentare l'oggetto quindi, nel tentativo di migliorare il prodotto finale, seguendo le indicazioni dell'autore del programma, è stata eseguita la rettifica delle singole immagini utilizzando un certificato di calibrazione ottenuto in laboratorio.

- **IMMAGINI RETTIFICATE**

La procedura utilizzata è la stessa effettuata con i fotogrammi non rettificati. In Figura 144 viene mostrata la ricostruzione della scena e in Figura 145 la nuvola densa di punti e si può notare fin da subito che la mole di informazioni è maggiore rispetto a quello che era stato ottenuto con le immagini non rettificate. Già dalla visualizzazione tridimensionale della scena si è notato il fatto che i punti restituiti erano aumentati.

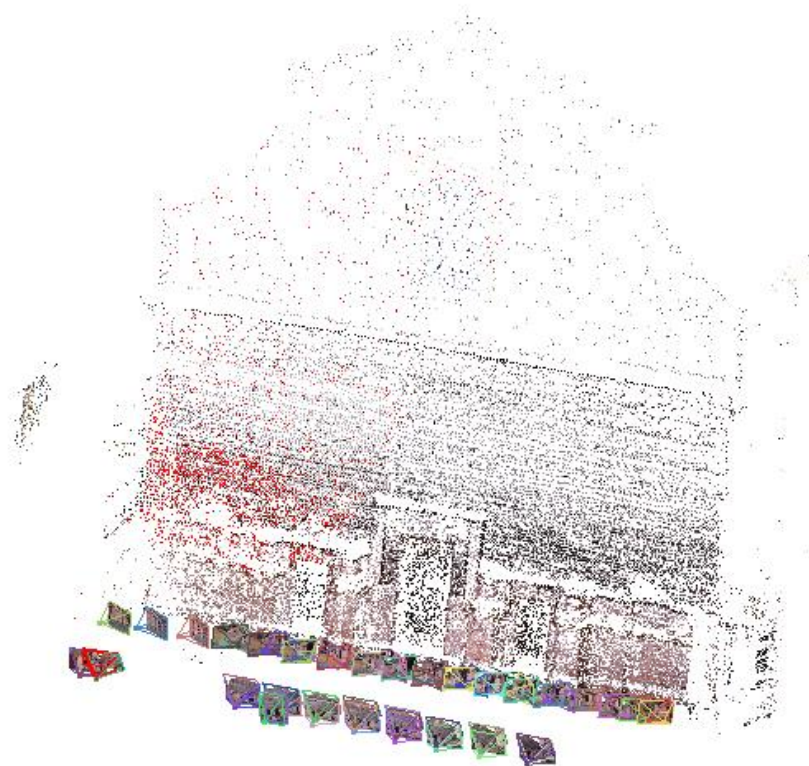


Figura 144: Ricostruzione automatica della struttura della scena. Viene ricostruita la geometria di presa e viene mostrato che le immagini sono state prese a distanza diversa.



Figura 145: Visualizzazione tridimensionale densa.

Il tempo impiegato è stato quello mostrato in Tabella 10 per un totale di circa 36 minuti.






COMANDO	TEMPO IMPIEGATO
	31 secondi
	354 secondi
	44 secondi
	28,5 minuti

Tabella 10: Tempo impiegato.

Come ultimo step l'immagine deve essere georeferenziata a partire da punti fotogrammetrici di appoggio di cui sono note le coordinate locali X, Y e Z.

Questo passaggio viene fatto tramite *GCP-based Transformation*  e, tramite questo comando viene aperta immediatamente una tendina come quella mostrata in Figura 146.

Control points work under the following Views:
Single Image and NView/Dense 3D Points

Below are the keyboard/mouse controls:
CTRL + Left Click: add or modify a point;
CTRL + Menu Click: clear existing data;
SHIFT + Menu Click: apply transformation.
ESCAPE: quit the point selection mode.
TAB: switch between dense & sparse points.
"Menu" refers to "GCP-based Transform".

Figura 146: Comandi GCP-based Transformation.

In ogni immagine si inseriscono manualmente i punti di appoggio tramite ID e le tre coordinate locali X, Y e Z e il software registra le coordinate dei punti inseriti (Figura 147).

```
#233: (2814.978, 504.774) (-14.1637, -7.3013,
0.0254)
-----
Model #0: 233 (out of 233) GCPs can be used
14 pairs of 3D points for transformation
Root of mean squared error = 0.055216
Mean absolute error = 0.051240
-----
#234: (3585.700, 1070.813) (-5.8002, -8.4248, 0.4508)
-----
Model #0: 234 (out of 234) GCPs can be used
14 pairs of 3D points for transformation
Root of mean squared error = 0.055201
Mean absolute error = 0.051221
```

Figura 147: Registrazione delle coordinate dei punti.

Dove

Root of mean squared error, che corrisponde alla varianza interna, vale:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Mean absolute error, che corrisponde alla media degli errori assoluti, vale:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (4)$$

Una volta terminato l'inserimento di tutti i punti di appoggio (Figura 148), si applica la trasformazione. Questa trasformazione è una trasformazione conforme a 7 parametri.

Si può notare (Figura 149) come per ciascuna trasformazione siano dati fattore di scala (S), parametri di rotazione (R), parametri di traslazione (T) e coordinate trasformate dei

punti di appoggio inseriti presenti nel modello specifico di cui a destra sono date le coordinate di input.



Figura 148: Visualizzazione dei target.

```
S = 2.344743757774
R = 0.99688264 -0.00467303 -0.07876018
    0.00160726 -0.99683454 0.07948790
    -0.07888231 -0.07936669 -0.99371953
T = 8.625420319037
    -13.307301589090
    25.039764982768
```

Figura 149: Parametri della trasformazione conforme con S fattore di scala, R i parametri di rotazione e T i parametri di traslazione.

Mettendo a confronto le coordinate inserite manualmente con quelle trasformate, si calcolano i residui dati dalla differenza tra il valore delle coordinate inserite e quelle trasformate, ottenendo i valori mostrati in Tabella 11.

NOME PUNTI	PFA (coord. locali)			TRASFORMATE VSFM			RESIDUI		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
2	-14,1637	-7,3013	0,0254	-14,1528	-7,2632	0,0343	-0,011	-0,038	-0,009
4	-5,8002	-8,4248	0,4508	-5,8174	-8,4609	0,4823	0,017	0,036	-0,032
5	-2,6434	-4,8217	0,4512	-2,6607	-4,8396	0,4392	0,017	0,018	0,012
6	2,1679	-4,6296	0,4623	2,1591	-4,6247	0,4593	0,009	-0,005	0,003
7	5,2413	-8,4308	0,4113	5,2424	-8,4931	0,4325	-0,001	0,062	-0,021
9	13,5611	-7,2912	0,0002	13,6156	-7,3621	-0,0064	-0,055	0,071	0,007
11	-16,1214	2,3245	-0,0568	-16,1100	2,3720	-0,0572	-0,011	-0,047	0,000
12	-11,8894	-1,2193	-0,0620	-11,8868	-1,1663	-0,0932	-0,003	-0,053	0,031
14	-0,5962	0,3576	-0,0474	-0,6146	0,3596	-0,0669	0,018	-0,002	0,020
15	7,3451	-1,4596	-0,0709	7,3724	-1,4159	-0,0773	-0,027	-0,044	0,006
17	14,9034	0,3366	-0,0593	14,9458	0,3375	-0,0600	-0,042	-0,001	0,001
18	-17,3637	9,7698	-0,6605	-17,3300	9,7707	-0,6487	-0,034	-0,001	-0,012
29	-9,1412	19,2423	-0,0093	-9,1350	19,2058	-0,0202	-0,006	0,037	0,011
34	-0,4232	22,9965	-0,3137	-0,4775	22,9916	-0,2961	0,054	0,005	-0,018
39	8,7509	19,1892	-0,0861	8,6842	19,2278	-0,0871	0,067	-0,039	0,001
			MEDIA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
			MIN	-0,055	-0,053	-0,052	-0,055	-0,053	-0,046
			MAX	0,067	0,071	0,0312	0,067	0,071	0,056

Tabella 11: Calcolo dei residui e della media.

Le medie calcolate sono tutte intorno al valore 0; questo individua la NON presenza di sistematismi.

I residui dell'orientamento esterno denotano un'informazione sulla congruenza dei punti e delle immagini ovvero la georeferenziazione complessiva dei punti ha un errore medio di 5 cm. Il fatto che la media degli errori ottenuti tramite Agisoft Photoscan, avendo utilizzato lo stesso data set di immagini e gli stessi punti utilizzati, è inferiore (Tabella 7) rispetto a quello ottenuto con Visual SfM fa pensare che il problema è il software open source in quanto presenta delle deficienze sull'orientamento interno dei singoli fotogrammi.

Il risultato, guardando la nuvola densa di punti creata con Visual SfM, mostra che utilizzando le immagini rettificate si ottiene una nuvola più densa e una restituzione maggiore di punti. Come mostrato in Figura 150 la nuvola delle immagini rettificate è più densa ma rimangono comunque delle porzioni che non sono state restituite come ad esempio nella porzione in cima alla facciata. Questo è dovuto al fatto che le prese sono state fatte solo da terra e non per livelli, come richiesto dalla fotogrammetria tradizionale.



Figura 150: Visualizzazione tridimensionale ottenuta con immagine non rettificata (a) e con immagini rettificate (b).

Il tempo di calcolo è stato simile per le prime due prove ed in Tabella 12 vengono mostrate le tempistiche impiegate dal programma e il numero di punti ottenuti. Dalla tabella infatti si dimostra il fatto che Visual SfM utilizza un algoritmo debole in quanto, rettificando le immagini, il numero dei punti restituiti è aumentato del 20% circa.

PROVE	N° FOTOGRAMMI	TEMPO IMPIEGATO	N° PUNTI
Prova 1	59 non rettificati	35 minuti	3002367
Prova 2	59 rettificati	36 minuti	3565849

Tabella 12: Caratteristiche delle due prove effettuate.

Una volta giunti a questo punto, per lo studio delle nuvole di punti tridimensionali si prenderà in considerazione quella ottenuta con immagini rettificate e georeferenziate nello spazio. Ciò sta a significare che la nuvola risulta orientata in un sistema di riferimento locale e per riportarla al sistema reale, applicando un orientamento assoluto, sarà anche necessario applicare un fattore di scala appropriato. Per questo motivo le nuvole sono state georeferenziate applicando una trasformazione conforme a 7 parametri (3 di traslazione, 3 di rotazione e 1 fattore di scala).


7.3 TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI

I programmi a disposizione degli utenti per elaborare queste nuvole di punti spesso sono di difficile utilizzo e forniscono molti più dati informativi rispetto a quelli che sono effettivamente richiesti e che il committente è in grado di gestire o servirsene.


L'ambiente che si è scelto di utilizzare per l'analisi della nuvola densa georeferenziata è *CloudCompare*, (*CloudCompare v2.6.1-User manual*). È un software di elaborazione ed editing di nuvole di punti tridimensionali. Originariamente è stato progettato per eseguire confronti diretti tra nuvole dense di punti 3D. Si basa su una specifica *struttura octree* (è una struttura dati ad albero dove ogni nodo interno ha otto figli) che consente grandi performance. Tipicamente usa una maglia triangolare, una nuvola di punti (vertici della maglia) con una topologia associata (triplette di punti connessi corrispondenti ad ogni triangolo).

Tra tutte le “caratteristiche” che possono essere associate ad una nuvola di punti (colore, normale, etc.) una ha particolare importanza: il campo scalare. *CloudCompare* è in grado di gestire più campi scalari contemporaneamente ed è anche possibile applicare delle operazioni (-, +, /, *) tra due campi scalari di una stessa nuvola.

Le entità che si trovano in *Cloud Compare* sono:

- Point Cloud : una nuvola di punti è un insieme di punti tridimensionali non organizzati (X,Y,Z).


Si può associare:

- Un unico colore per l'intera entità (RGB);
 - Colori per punti (RGB);
 - Vettori normali per punto (N_x , N_y , N_z).
- Mesh : è un insieme di triangoli. Internamente, i triangoli sono rappresentati da triplette di indici interi. Questi indici sono relativi a una nuvola associata (vertici della mesh). Ad una maglia possono essere associati:

- Vettori normali per triangolo (N_x, N_y, N_z);
- Materiali per triangolo.


Una mesh tipica generalmente corrisponde ad un unico oggetto.

Tramite l'impiego di questo software, a partire da una nuvola densa di punti realizzata precedentemente, si può perfezionare e isolare solo la parte di effettivo interesse.

In particolare è possibile selezionare solo una parte dell'intera nuvola con il comando taglia (*Segment* ) che permette di conservare o eliminare la parte selezionata.

È inoltre possibile unire nuvole di punti differenti per crearne una unica.

Tale operazione può essere realizzata tramite il comando *Merge* .

Si possono poi creare sezioni dell'oggetto in esame tramite *Cross Section* . Permette all'utente di definire una casella di ritaglio attorno alla nuvola. Con questo comando si possono anche estrarre in sequenza una serie di segmentazioni ed estrarre contorni poligonali in ogni "fetta".

Si ricorda che le nuvole sono costituite da un insieme di punti nello spazio modello rappresentati con livelli radiometrici differenti, tali livelli di colorazione corrispondono al valore d'intensità del pixel corrispondente al punto 3D nell'immagine di riferimento o ad una media dei valori radiometrici presenti sui pixel di tutte le immagini in cui tale punto è visibile.

La nuvola densa di punti ottenuta tramite *Agisoft Photoscan* è quella mostrata in Figura 151 ed è costituita da 22747168 punti.



Figura 151: Nuvola densa di punti.


Come prima azione è necessario pulire il più possibile la nuvola di punti in modo tale da isolare ed eliminare *outliers*. Questi outliers rappresentano dei valori distanti da un campo di dati raccolti. L'eliminazione degli outliers, è stata eseguita manualmente con il comando *Segment* . Il risultato è quello mostrato in Figura 152.



Figura 152: Nuvola pulita dopo la pulizia.

A questo punto si è ottenuta una nuvola densa composta da 21069302 punti. Rispetto a quella iniziale ne sono stati eliminati 1677866.

La nuvola di punti ottenuta tramite *VisualSfm* è quella mostrata in Figura 153 ed è costituita da 3565849 punti.



Figura 153: Nuvola densa di punti.

Come prima azione è necessario pulire il più possibile la nuvola di punti in modo tale da isolare ed eliminare *outliers*. Questi outliers rappresentano dei valori distanti da un campo di dati raccolti.

Esistono dei comandi quasi automatici per eseguire questa operazione che si decide quindi di applicare per una prima pulizia, per poi passare a rilevarne eventuali residui manualmente.

Il comando è rappresentato da  ossia *Label Connected Components*.

Questo strumento segmenta la nuvola selezionata in parti più piccole separate da una distanza minima. Ogni parte rappresenta un componente collegato. Si seleziona la nuvola e si aziona il comando mostrato in Figura 154.

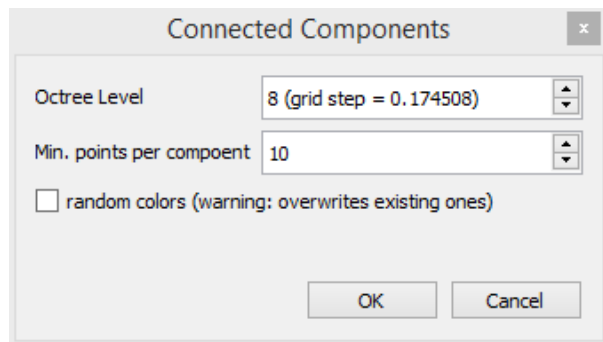


Figura 154: Interfaccia Label Connected Components.

Vengono richiesti alcuni parametri:

- *Octree Level* definisce quanto deve essere piccola la distanza tra due componenti. CloudCompare utilizza una griglia tridimensionale per estrarre i componenti collegati.
- *Min. points per component* permette di scegliere quali componenti sono da tenere in considerazione e quali da ignorare in funzione del numero minimo di punti di cui sono formati.

Al termine del processo i componenti saranno dei sottoinsiemi della nube originale con le stesse caratteristiche (campi scalari, normali e colori) (Figura 155).

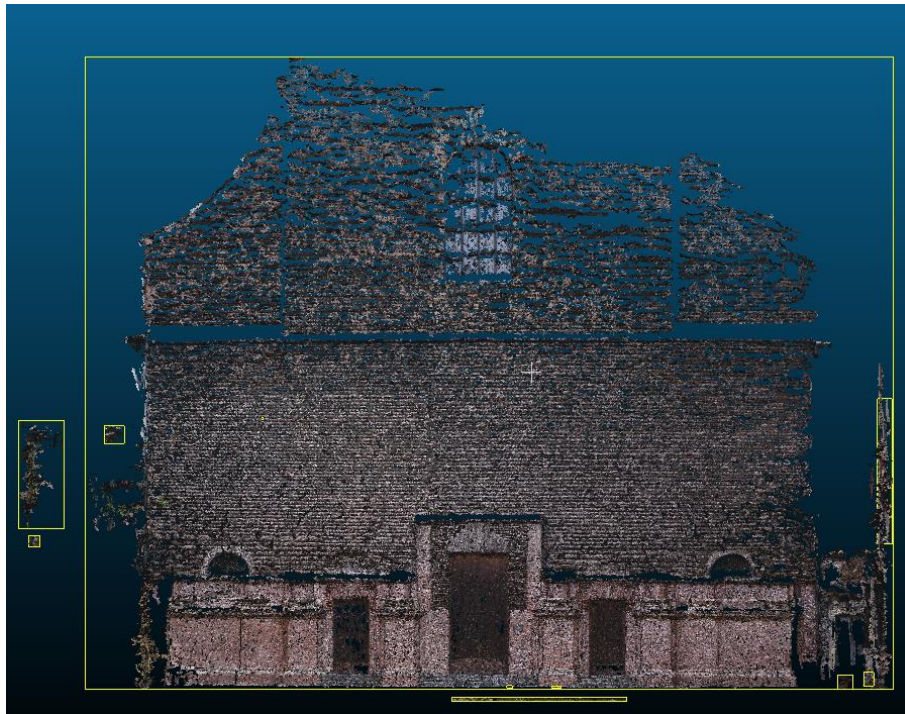


Figura 155: Vista dei componenti creati dall' algoritmo *Label Connected Components*.

Come si può vedere dall'immagine sopra vengono generate una serie di nuvole in cui, la prima 'CC#0' rappresenta il soggetto principale più esteso, mentre le altre sono sottogruppi, esaminati ed infine, alcuni, eliminati (Figura 156).





-  CC#0
-  CC#1
-  CC#2
-  CC#3
-  CC#4
-  CC#5
-  CC#6

Figura 156: Scomposizione in gruppi di punti.

Si procede con questa pulitura automatica fino a che la nuvola risulta non ulteriormente scomponibile. Oltre alla procedura automatica, l'eliminazione degli outliers, è stata eseguita manualmente con il comando *Segment*  e il risultato è mostrato in Figura 157.

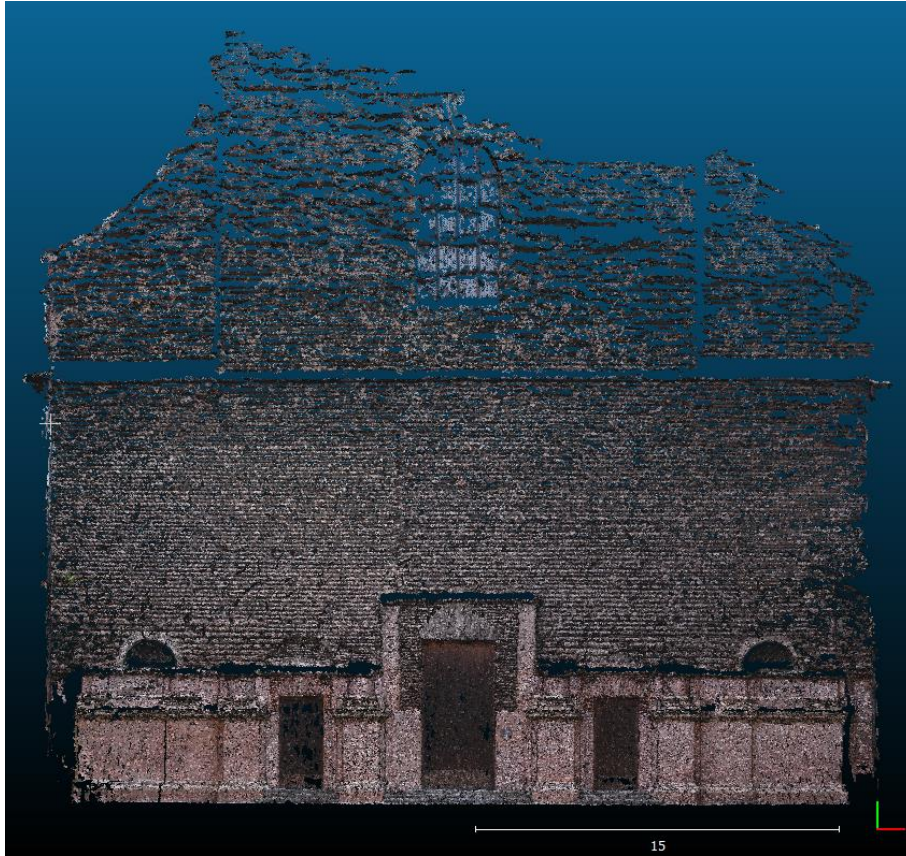


Figura 157: Nuvola dopo la pulizia.

A questo punto si è ottenuta una nuvola densa composta da 3339558 punti. Rispetto a quella iniziale ne sono stati eliminati 226291.

7.4 FOTO RADDRIZZAMENTO E VETTORIZIAZIONE

7.4.1 FOTO RADDRIZZAMENTO

Il raddrizzamento fotografico è una tecnica che permette di modificare una fotografia in modo che essa divenga una prospettiva di tipo ortogonale, nell'ipotesi che l'oggetto sia piano. Il prodotto ottenuto, cioè l'immagine raddrizzata, se opportunamente scalato diviene una rappresentazione metrica, ossia utilizzabile per estrarre misure e distanze (Figura 158).

Con un approccio a singola immagine, tramite il procedimento del raddrizzamento, si può effettuare la restituzione di un oggetto piano a partire da un singolo fotogramma, dato che in tal caso si ha una ben individuabile e biunivoca corrispondenza di tipo proiettivo fra punti immagine e punti del terreno; fra di essi esiste infatti una relazione prospettica con centro nel punto di presa, e fra i punti del terreno ed i punti sulla carta esiste una relazione prospettica con centro all'infinito (proiezione ortogonale sul piano di riferimento) ed una similitudine definita dalla scala della carta; ne deriva che fra i punti immagine sul fotogramma ed i punti della carta esiste una corrispondenza omografica o affine.

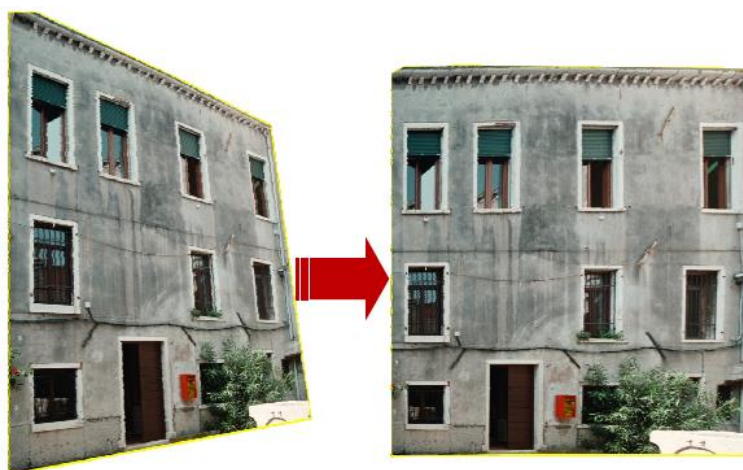


Figura 158: Esempio di un foto raddrizzamento.

Le tecniche per produrre un'immagine raddrizzata sono essenzialmente due:

- Tecniche geometriche che sfruttano linee orizzontali e verticali;
- Tecniche analitiche che usano punti di coordinate note o distanze.

I software a disposizione per realizzare il raddrizzamento d'immagine sono diversi, alcuni come programmi a se stanti, altri integrati al CAD, alcuni sviluppati per scopi didattici e messi a disposizione freeware, altri commerciali.

Quello utilizzato in questo studio è stato il software freeware *RDF* (RDF website).

Questo software è stato realizzato dal Laboratorio di Fotogrammetria CIRCE dell'Università IUAV di Venezia, per scopi didattici. RDF realizza il raddrizzamento di immagini digitali di oggetti piani o che possono essere considerati tali e la trasformazione proiettiva può essere eseguita per via analitica o per via geometrica applicando la compensazione delle osservazioni secondo il metodo delle osservazioni indirette. Nell'immagine corretta è possibile digitalizzare un set di punti in coordinate assolute esportabile in formato .dxf.

In questo studio è stato effettuato il raddrizzamento, ovvero è stato restituito un oggetto piano, a partire da un singolo fotogramma. L'utilizzo di un solo fotogramma ha il vantaggio di essere rapido ed economico e il prodotto ottenuto è leggibile e caratterizzato da una precisione metrica che può soddisfare le esigenze in ambito architettonico per l'esecuzione, ad esempio, di un progetto di restauro. L'esecuzione per via analitica, in ambiente digitale, viene fatto sulla base della conoscenza di almeno 4 punti dell'oggetto a coordinate note.

Il raddrizzamento per via analitica tratta della trasformazione proiettiva o omografica (trasformazione di un piano in un altro attraverso il centro di proiezione). La trasformazione richiede la conoscenza delle coordinate 2D di almeno 4 punti sul piano non allineati ($\det \neq 0$).

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1} \\ Y &= \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1} \end{aligned} \tag{5}$$

Dove $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ sono i nuovi 8 parametri ricavabili dalle equazioni di collinearità e sono funzioni dei parametri di orientamento interno ed esterno.

Con la condizione che:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & 1 \end{pmatrix} \neq 0 \quad (6)$$

L'aspetto essenziale della produzione di un raddrizzamento digitale consiste nella trasformazione della matrice-immagine originaria in una matrice-immagine nel piano XY del sistema di coordinate oggetto (Figura 159).

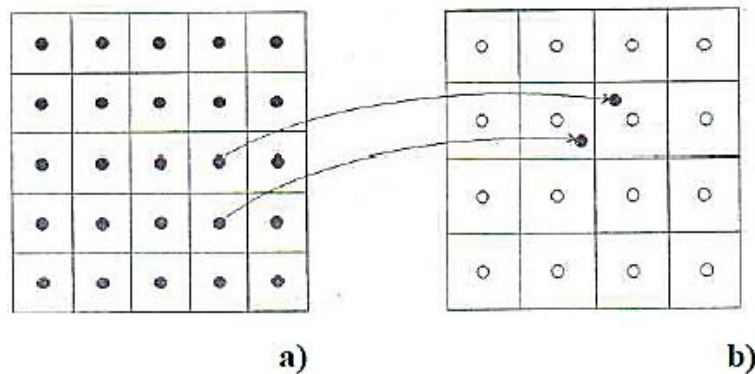


Figura 159: Il principio del ricampionamento in un'immagine applicato al raddrizzamento digitale.
 a) l'immagine raddrizzata; b) l'immagine originale. Nota la relazione geometrica tra le due immagini (omografia), il valore radiometrico di ogni pixel viene ricavato dall'immagine originale mediante algoritmi di ricampionamento.

7.4.1.1 STRATEGIA ESEGUITA

Avviato RDF, appare una finestra (Figura 160) dalla quale si può scegliere il tipo di raddrizzamento che si vuole effettuare. In questo caso di studio, avendo noti i punti di appoggio sulla facciata, è stato effettuato un raddrizzamento di tipo *Analitico*.



Figura 160: Interfaccia iniziale.

Per effettuare un raddrizzamento con RDF è necessario disporre di un'immagine digitale dell'oggetto, cioè di una fotografia digitale o digitalizzata attraverso uno scanner (Figura 161). La fotografia utilizzata è stata scattata con una macchina digitale CANON EOS 6D.



Figura 161: Fotografia iniziale.

Per aprire l'immagine si può utilizzare il comando *Immagine iniziale* → *Apri* dal menu a tendina (Figura 162).

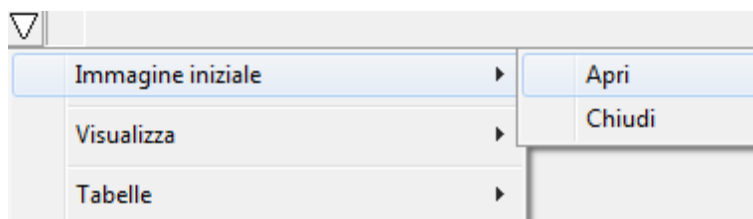


Figura 162: Caricare l'immagine iniziale.

Dopo aver caricato un'immagine, muovendo il cursore all'interno della finestra che la contiene, vengono visualizzate nella barra di stato in basso allo schermo le coordinate del punto su cui si trova il cursore (coordinate immagine); in questo caso sono espresse in pixel, cioè coordinate piane x, y (con le x crescenti da sinistra verso destra e le y dall'alto verso il basso). Lo spostamento minimo è il pixel stesso, ovvero il più piccolo elemento in cui è scomposta l'immagine e dipende quindi dalla risoluzione dell'immagine stessa (Figura 163).

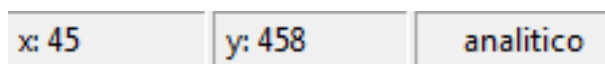


Figura 163: Coordinate immagine visualizzate nella barra di stato.

Quando l'immagine è molto grande e non appare completamente nello schermo, per andare con facilità in un punto voluto si può utilizzare la funzione navigatore; con il comando *Visualizza* → *Navigatore* si apre una finestra che visualizza tutta l'immagine caricata: cliccando sopra la zona interessata, l'immagine principale si posiziona in quel punto (Figura 164).



Figura 164: Visualizzazione del navigatore.

E' possibile fare degli zoom di un particolare dell'oggetto presente nell'immagine selezionata; per farlo utilizzare dal menu a tendina *Visualizza* → *Zoom*: spostandosi sull'immagine e cliccando con il tasto destro del mouse un punto qualsiasi della stessa si aprirà in corrispondenza dello stesso un riquadro contenente l'ingrandimento di un intorno del punto (Figura 165).



Figura 165: Visualizzazione dello zoom.

La **prima fase** è l'inserimento delle coordinate oggetto dei PFA. Per il calcolo dei parametri di trasformazione da immagine iniziale ad immagine raddrizzata è necessario conoscere le coordinate di almeno 4 punti (meglio se in numero maggiore) dell'oggetto e visibili sull'immagine. Per effettuare un raddrizzamento corretto è inoltre necessario che i punti siano distribuiti sul bordo dell'immagine in modo omogeneo.

Ovviamente i punti devono appartenere ad un piano ed il sistema di riferimento a cui si riferiscono le loro coordinate deve essere tale che le x siano crescenti verso destra e le y siano crescenti verso l'alto. La costruzione di questo file è stata eseguita utilizzando il comando *Tabella* → *Coordinate Oggetto*; in questo caso si apre la finestra di "Tabella coordinate oggetto", vengono inserite ed infine salvate in un file .ogg con il comando *Tabelle* → *Coordinate oggetto (.ogg)* → *Salva* (Tabella 13).

In questo studio sono stati utilizzati 14 PFA.

nome	x	y
2	-14.1637	-7.3013
4	-5.8002	-8.4248
5	-2.6434	-4.8217
7	5.2413	-8.4308
9	13.5611	-7.2912
11	-16.1214	2.3245
12	-11.8894	-1.2193
14	-0.5962	0.3576
15	7.3451	-1.4596
17	14.9034	0.3366
18	-17.3637	9.7698
29	-9.1412	19.2423
34	-0.4232	22.9965
39	8.7509	19.1892

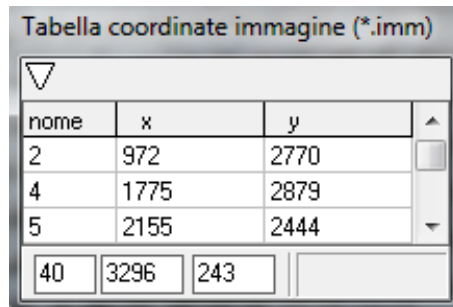
Tabella 13: Tabella coordinate oggetto.

Successivamente, come **seconda fase**, vengono inserite le coordinate immagine. La tabella delle coordinate immagine deve contenere le corrispondenti coordinate pixel dei punti di appoggio individuati sull'oggetto. Per compilare tale tabella bisogna provvedere alla collimazione degli stessi sull'immagine. Per iniziare tale operazione è stato utilizzato il comando *Tabella* → *Coordinate immagine (.imm)* → *Visualizza*: verrà aperta la finestra per la collimazione dei punti.

A questo punto bisogna collimare i punti sull'immagine (senza preoccuparsi della sequenza); per entrare in modalità di collimazione (appare la scritta *collimazione* sull'apposita casella della barra di stato della finestra principale), è stato utilizzato il comando *inizio collimazione*, con il tasto sinistro del mouse selezionare il punto desiderato sull'immagine (cliccando sopra al punto con il tasto destro del mouse si apre lo zoom, se è stato attivato in precedenza), ci si posiziona sul pixel esatto e si agisce sul tasto sinistro per collimare. Nella parte bassa della finestra "Tabella coordinate immagine" ci sono tre caselle: nella seconda e terza delle quali vengono visualizzate le coordinate x, y del punto collimato, mentre nella prima viene assegnato di default un numero progressivo che rappresenta il nome del punto e che può essere cambiato per

renderlo uguale al nome del corrispondente punto della tabella delle coordinate oggetto precedentemente caricata.

Una volta selezionato il punto, per poterlo inserire in tabella, è stato utilizzato il comando *registra punto*. In questo modo sull'immagine appare una croce con il nome (numero) del punto e in tabella vengono memorizzate le sue coordinate (Tabella 14).



nome	x	y
2	972	2770
4	1775	2879
5	2155	2444

40 3296 243

Tabella 14: Tabella coordinate immagine.

E' possibile salvare il file in formato *.imm* di coordinate immagine creato, con il comando *Tabelle → Coordinate immagine (.imm) → Salva*.

La **terza fase** riguarda il calcolo dei parametri di raddrizzamento. Per tale scopo è necessario creare un file in formato *.fot* in cui vengano associate le coordinate oggetto di ogni punto d'appoggio alle corrispondenti coordinate immagine. La struttura di questo file è: nome punto, x immagine, y immagine, x oggetto, y oggetto.

Avendo creato in precedenza un file per le coordinate immagine e uno per le coordinate oggetto, aprire la finestra della Tabella coordinate unione con il comando *Tabelle → Coordinate unione (.fot) → Visualizza* e selezionare crea file fot (Tabella 15).

nome	x	y	X	Y
2	972	2771	-14.1637	-7.3013
4	1775	2879	-5.8002	-8.4248
5	2154	2445	-2.6434	-4.8217
7	3090	2844	5.2413	-8.4308
9	4165	2654	13.5611	-7.2912
11	982	1835	-16.1214	2.3245
12	1294	2134	-11.8894	-1.2193
14	2418	1893	-0.5962	0.3576
15	3310	2007	7.3451	-1.4596
17	4187	1742	14.9034	0.3366
18	1049	1270	-17.3637	9.7698
29	1778	485	-9.1412	19.2423
34	2499	149	-0.4232	22.9965
39	3296	244	8.7509	19.1892

Tabella 15: Tabella coordinate unione.

E' fondamentale che i punti corrispondenti abbiano lo stesso nome, in quanto il programma individua per ogni punto immagine il corrispondente sulla tabella oggetto facendo un confronto sul nome.

Per salvare il file è stato utilizzato il comando *Tabelle* → *Coordinate unione (.fot)* → *Salva*.

La **quarta fase** riguarda il calcolo dei residui. Per capire se i punti sono stati collimati in modo corretto o per vedere se vi sono degli errori nelle coordinate oggetto è possibile fare l'analisi dei residui. Cliccando *Tabelle* → *Residui*, verrà aperta la seguente finestra per il calcolo dei residui.

Con il comando *calcola parametri diretti* vengono calcolati i parametri della trasformazione da coordinate immagine a coordinate oggetto e, a partire da questi, vengono ricalcolate le coordinate oggetto dei punti d'appoggio e i residui corrispondenti a ciascun punto, ovvero la differenza tra le coordinate oggetto inserite e quelle ricalcolate (Tabella 16).

nome	x	y	res x	res y
2	-14.106	-7.279	0.100	0.038
4	-5.958	-8.440	-0.294	-0.028
5	-2.774	-4.795	-0.237	0.049
7	5.338	-8.440	0.194	-0.019
9	13.537	-7.247	-0.051	0.092
11	-16.237	2.399	-0.177	0.114
12	-11.921	-1.223	-0.052	-0.006
14	-0.548	0.324	0.082	-0.057
15	7.508	-1.473	0.303	-0.024
17	14.874	0.316	-0.057	-0.039
18	-17.013	9.498	0.495	-0.383
29	-9.297	19.580	-0.207	0.448
34	-0.425	22.929	-0.002	-0.091
39	8.685	19.125	-0.096	-0.094
				sqm: 0,0510715078

Tabella 16: Tabella per il calcolo dei residui.

Bisogna sempre tener presente che per il calcolo sono necessari almeno 4 punti e che nel caso minimo i residui saranno nulli, essendo il sistema isodeterminato. Per poter salvare i residui è stato utilizzato il comando *salva residui*. Tali residui presentano uno scarto quadratico medio pari a 0.05 ma, da come si denota andando a controllare i singoli residui dei punti di appoggio, essi presentano valori che vanno dall'ordine del millimetro all'ordine di qualche decina di centimetri.

La **quinta fase** riguarda la selezione dell'area, cioè la selezione della porzione d'immagine che si vuole raddrizzare. Questa fase è necessaria per poter procedere con il ricampionamento. Per poter attuare questa fase viene selezionato il comando *Seleziona area di ricampionamento* e, successivamente, può essere definita la zona dell'immagine che verrà corretta individuando, sull'immagine stessa, l'area da raddrizzare definendo i 4 punti che la racchiudono con il tasto sinistro del mouse.

Cliccato l'ultimo punto appare la seguente finestra che definisce gli estremi dell'immagine ricampionata (Figura 166).

Area di ricampionamento

▽

-41.468 **X_{in}**

36.388 **Y_{in}**

29.390 **X_{fin}**

-14.589 **Y_{fin}**

Figura 166: Dimensioni area di ricampionamento.

La **sesta fase** è costituita dalla definizione della risoluzione dell'immagine. Una volta stabilita l'area è necessario impostare il passo di ricampionamento: tale valore rappresenta la dimensione in unità oggetto (metri per esempio) di ogni pixel dell'immagine finale (raddrizzata) (Figura 167).

Scala dell'immagine corretta

▽

Valore in metri di un pixel: 0.006

Risoluzione immagine corretta (dpi): 423.333

Dimensione immagine corretta (pi): 11853 x 8612

Dimensione immagine corretta (cm): 71.116 x 51.669

Figura 167: Scala dell'immagine corretta.

Bisogna far attenzione al valore inserito: se è troppo piccolo si rischia di ottenere un'immagine di dimensioni troppo grandi e quindi non gestibile dal sistema; se è troppo grande si ottiene un'immagine troppo piccola e quindi non visibile.

Si tenga presente che le dimensioni dell'immagine finale saranno date dalle equazioni:

$$n = ((x_{fin}-x_{in})/passo) \tag{6}$$

$$m = ((y_{fin}-y_{in})/passo)$$

dove n è la larghezza dell'immagine ed m l'altezza in pixel, x_{in}, y_{in}, x_{fin}, y_{fin} sono le coordinate dei punti che individuano l'area selezionata e il passo è la dimensione di 1 pixel.

Per definire tale valore si deve aprire la finestra *Scala dell'immagine corretta* con il comando *RDF* → *Esegui* ed inserire nella casella indicata con “valore in metri di 1 pixel”

il valore del pixel e automaticamente comparirà la corrispondente risoluzione nella casella indicata con “risoluzione dell’immagine corretta”. È anche possibile decidere di inserire il valore della risoluzione finale nell’apposita casella anziché quello del pixel.

A questo punto, come **settima** ed ultima **fase**, è possibile effettuare il raddrizzamento dell’immagine iniziale. Per vedere se sono stati commessi degli errori si può effettuare un’*anteprima* del raddrizzamento. Se tutte le operazioni descritte sono state eseguite correttamente è necessario utilizzare il comando *RDF*. L’immagine corretta si comporrà sullo schermo e verrà visualizzata una barra di scorrimento sulla parte inferiore della finestra che indicherà lo stato di avanzamento della trasformazione. Effettuato il ricampionamento, sarà possibile visualizzare contemporaneamente le due immagini, quella iniziale e quella corretta. L’immagine raddrizzata (Figura 168) viene salvata in formato .Bmp dal comando *Immagine corretta* → *Salva*.

Contemporaneamente al salvataggio dell’immagine viene creato un file di testo che contiene le informazioni principali dell’immagine.

In questo modo è stata ottenuta un’immagine raddrizzata con caratteristiche numeriche.



Figura 168: Immagine raddrizzata.

7.4.2 VETTORIALIZZAZIONE

Il formato vettoriale è un formato che organizza la memorizzazione di dati per mezzo di quei semplici elementi che costituiscono le primitive grafiche della geometria cartesiana. E' una rappresentazione che non ha nulla in comune con quella raster se non il fatto che entrambe descrivono immagini numeriche. La profonda differenza è insita nel modo con il quale il dato viene rappresentato: nelle immagini raster c'è l'esigenza di definire ogni oggetto per mezzo di quell'insieme finito di elementi che lo compongono, ognuno di essi definito a sua volta da parametri o coordinate di tipo discreto; la rappresentazione vettoriale invece si avvale di modelli ed equazioni matematiche. Una definizione di questo tipo permette la rappresentazione degli infiniti punti di cui è composto un oggetto spaziale.



La restituzione fotogrammetrica, soprattutto per i beni architettonici, è di fondamentale importanza in quanto consente lo studio e la conservazione del patrimonio architettonico. In questo caso di studio verrà restituito il prospetto frontale della ex Chiesa di Santa Lucia andando ad evidenziare i piani della facciata, la situazione di degrado e il tipo di muratura che caratterizza la facciata.

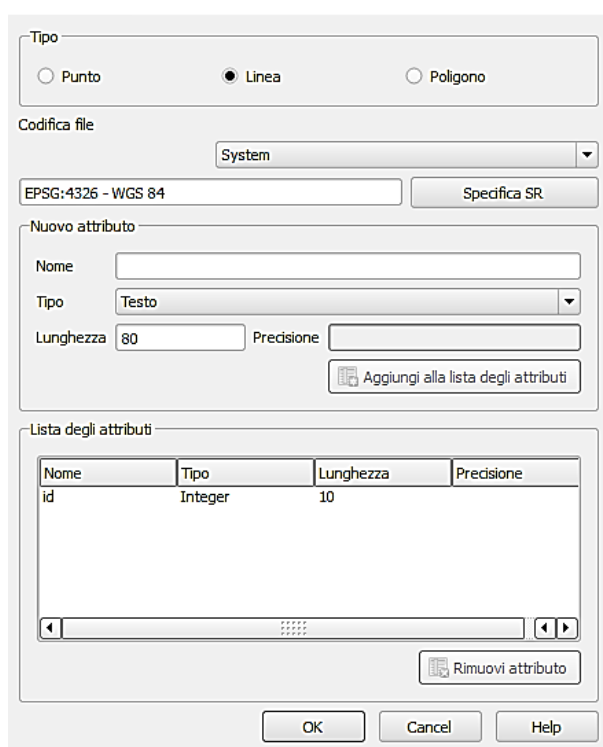
È stata dunque generata una cartografia numerica sul prospetto della facciata con la funzione di essere di supporto per moltissime applicazioni architettoniche come, ad esempio, studiare e impostare un'opera di restauro per l'oggetto stesso, studiare la presenza e la distribuzione di un quadro fessurativo (non è questo il caso) o identificare le porzioni di muratura staccata.

Per ottenere ciò, l'immagine raster ottenuta con RDF è stata salvata in .TIFF ed è stata importata in ambiente GIS per la procedura di restituzione. A corredo dell'immagine, c'è il file di georeferenziazione, che in formato standard ha estensione .tfw. Si è fatto ricorso ad un software largamente impiegato, di tipo Open Source (*QGIS Desktop; QGIS website*).

È stata eseguita una cartografia tematica dell'oggetto, suddividendo in livelli logici differenti le caratteristiche della facciata che si è deciso di evidenziare. Nella procedura di vettorializzazione si è adottato un'entità di restituzione di tipo linea con attributi differenti in funzione ai diversi elementi identificati. Una legenda dei tematismi estratti

è mostrata nel seguito in cui è stato deciso di dividere in più *layers* le varie tipologie di elementi murari presenti sulla facciata, di suddividere le porzioni di facciata più sporgenti rispetto alle altre, la presenza di gronde e di aperture.

Per poter effettuare questo passaggio sono stati utilizzati i comandi *Layer* → *Nuovo* → *Nuovo Shapefile* e successivamente si è aperta una casella in cui bisogna inserire le caratteristiche del layer. Come tipologia è stato selezionato *linea*, è stato immesso il nome del layer ed è stato salvato (Figura 169). Una volta creato il layer, per poterlo usare, è stato selezionato il comando *Modifica*  → *Aggiungi Elemento* .



Nome	Tipo	Lunghezza	Precisione
id	Integer	10	

Figura 169: Creazione di un nuovo layer.

Il risultato finale è quello mostrato in Figura 170.



Figura 170: Restituzione dell'oggetto.

In Figura 171 viene mostrata in diversi layers (ognuno con un colore diverso) i quali hanno significati diversi e vengono mostrati per identificare le parti man mano più sporgenti della chiesa.

- In **Arancio** viene mostrata una parte sommitale, nella parte destra e sinistra della facciata, che è la più rientrante;
- In **viola** viene mostrata una parte della facciata leggermente rialzata rispetto alla precedente;
- In **azzurro** viene mostrata la base della chiesa la quale ha una sporgenza maggiore rispetto alle parti precedentemente descritte ed è rappresentata da delle colonne.

Successivamente vengono mostrati con altri layer dei particolari della facciata:

- In **rosso** vengono rappresentate le aperture, quali un portone principale, due porticine secondarie, due finestre a mezza luna e una finestra centrale nella parte alta della facciata;
- In **nero** la gronda, presente sia a destra che a sinistra della facciata;
- In **blu** i fori presenti in tutta la facciata che costituivano un paramento predisposto originariamente per essere rivestito dalla cortina in lastre lapidee e marmoree decorate ipotizzata ma mai realizzata.

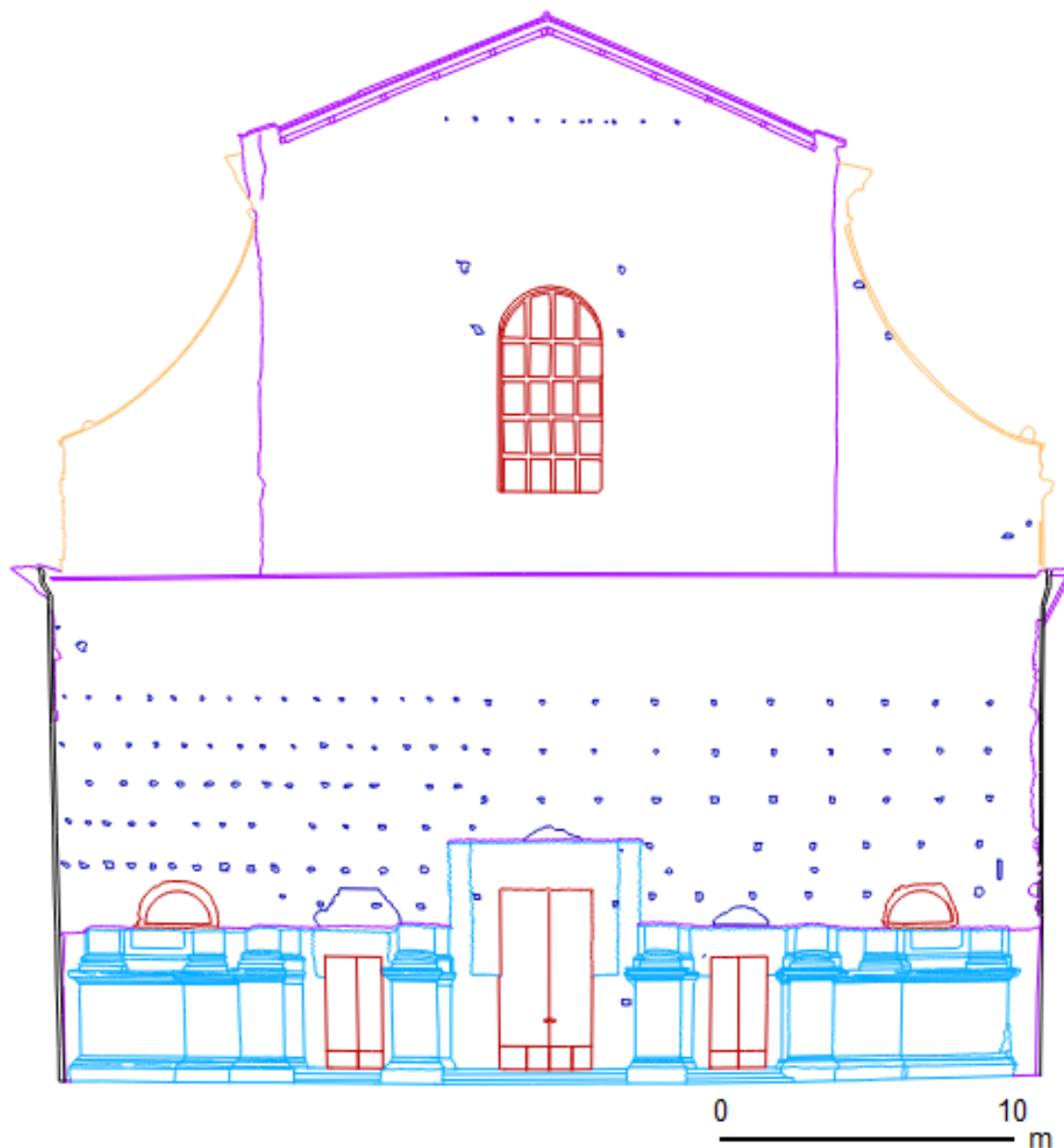


Figura 171: Prima suddivisione dei layer.

Oltre alla struttura della facciata, sono stati rappresentati nel dettaglio le varie tipologie murarie, le varie porzioni di muro deteriorate e in cui non sono più presenti i mattoni (Figura 172).

Sono state evidenziate quattro diverse tipologie murarie:

- In **rosa** viene mostrata la muratura che va a decorare le colonne posizionate alla base, e rappresenta l'unica porzione della facciata della chiesa realizzata e conclusa;
- In **verde** una muratura differente sia per colore che dimensioni che va a decorare le due porticine secondarie e la finestra in alto;
- In **marrone** una paramento murario in laterizio che decora il portone principale e una parte della facciata che è rimasta incompiuta;
- In **grigio**, dei mattoni disposti “a dente di sega” in stile medioevale che vanno a decorare l'intera facciata. Questa ultima tipologia di mattone doveva essere rivestito dalla cortina in lastre lapidee e marmoree decorate ma, per motivi spiegati nel capitolo 5, il rivestimento non è mai stato realizzato.

Oltre alle tipologie murarie sono state evidenziate:

- In **verde chiaro** le varie zone di degrado, deturpate dal tempo e dall'umidità in cui non vi è più la presenza di mattoni.

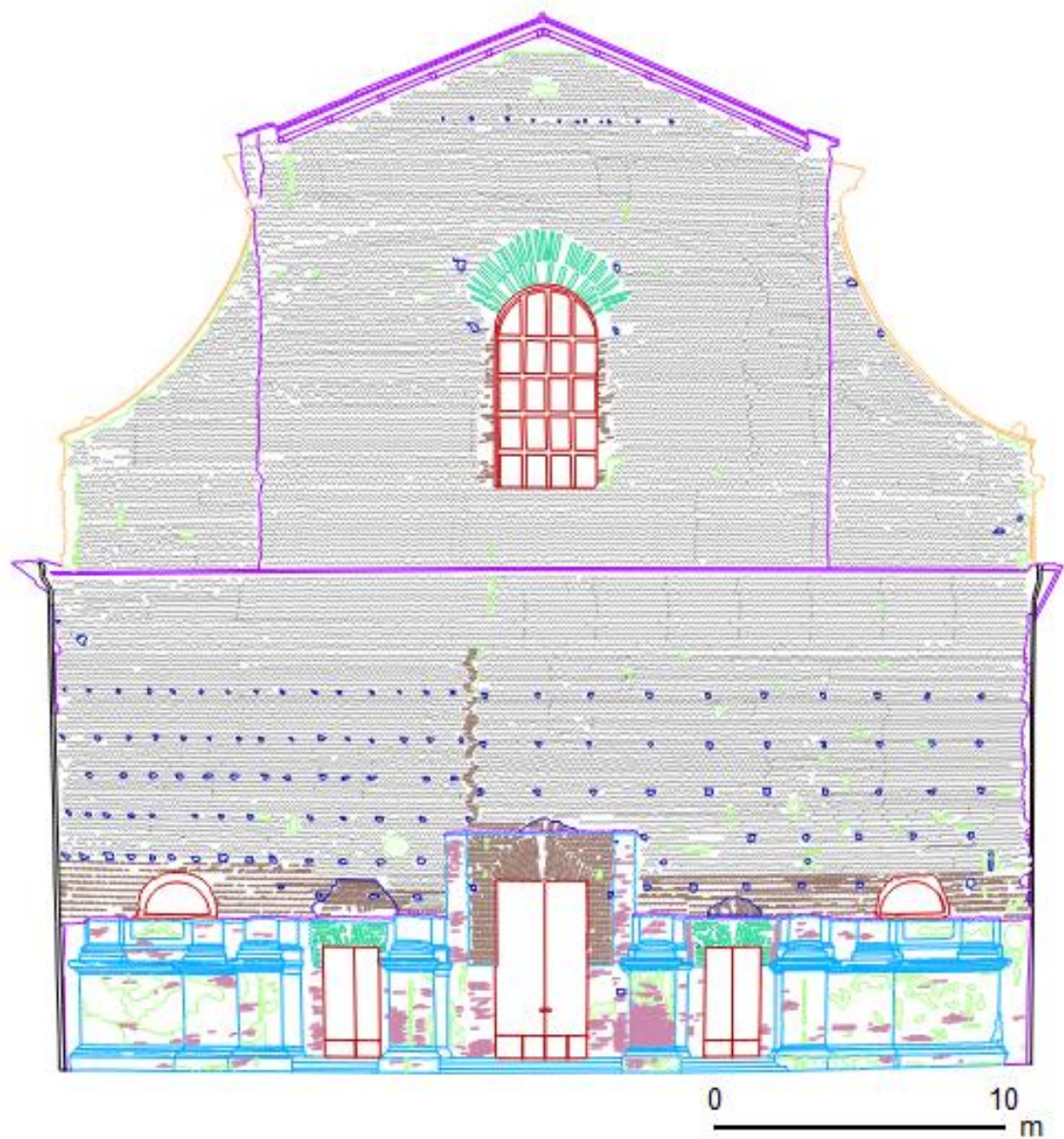
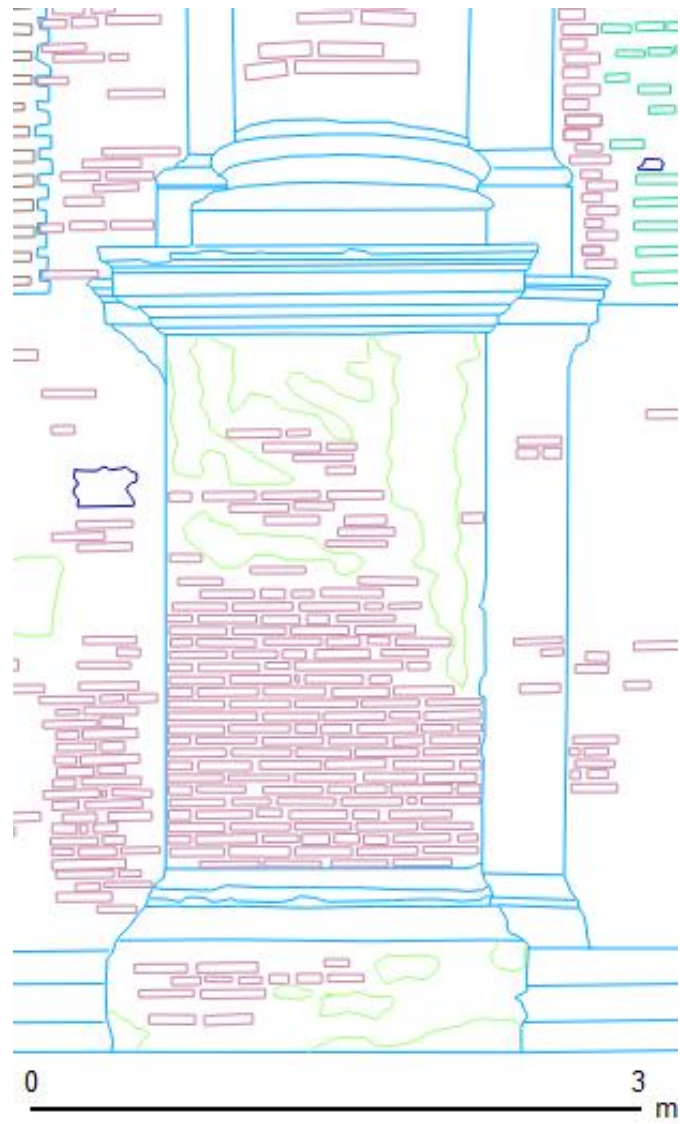


Figura 172: Restituzione al tratto della facciata della chiesa. Le linee di diverso colore identificano discontinuità e elementi descritti nel testo.

In figura vengono mostrati particolari di restituzione della facciata in Figura 173 e in Figura 174.



- colonne alla base della chiesa
- fori
- zone di degrado
- muratura che decora le colonne
- muratura che decora la porticina
- muratura che decora il portone

Figura 173: Particolare della colonna a destra del portone principale e relativa legenda.



- colonne alla base della chiesa
- aperture
- fori
- zone di degrado
- muratura che decora le colonne
- muratura che decora la porticina
- muratura che decora il portone
- muratura a “dente di sega”

Figura 174: Particolare della parte destra in basso della facciata e relativa legenda.

8. CONFRONTO FRA I MODELLI

In questo capitolo viene mostrata la strategia teorica per la valutazione degli errori nella restituzione fotogrammetrica sia per i modelli tridimensionali sia per il modello bidimensionale. Successivamente viene convalidata o meno questa valutazione teorica tramite il dato che è stato preso come riferimento, cioè la nuvola di punti tridimensionale ottenuta con il rilievo laser.

8.1 VALUTAZIONE TEORICA DEGLI ERRORI NELLA RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA

In fotogrammetria terrestre è necessario progettare con cura lo schema delle prese. Molteplici sono gli aspetti da chiarire quali le posizioni più favorevoli per la presa, la lunghezza della base e del ricoprimento dell'oggetto.

Il primo fattore da determinare è la scala dei fotogrammi attraverso la relazione:

$$m_b = \frac{h}{c} \quad (1)$$

Dove:

h è la distanza fra l'oggetto e il centro di presa,

c è la focale dell'obbiettivo della fotocamera.

Si riporta di seguito, in Tabella 17, i dati relativi al rilievo effettuato.

DETTAGLI del RILIEVO	
DISTANZA DI PRESA media (h) alla base della facciata	11,5 m
DISTANZA DI PRESA media (h) nella parte più alta dalla facciata	36,08 m
LUNGHEZZA FOCALE (c)	0,024 m
FATTORE DI SCALA alla base ($mb=h/c$)	479,17
FATTORE DI SCALA in sommità ($mb=h/c$)	1503,33
DIMENSIONE PIXEL SENSORE	6,5 μm
GSD (Ground Sample Distance) alla base	0,003 m
GSD (Ground Sample Distance) in sommità	0,01 m
DIMENSIONE FOTO in pixel	3648 x 5472 pixel
DIMENSIONE FOTO in m	0,024 x 0,036 m
FOTOBASE (valore medio)	2,35 m

Tabella 17: Dettagli rilievo effettuato.

In questo caso, l'accuratezza del DSM (*Digital Surface Model*) dipende dalla distanza di presa da cui sono state prese le immagini e dalla tipologia di metodo matematico di calcolo scelto.

In questo studio sono stati analizzati 4 metodi.

Il primo metodo consiste nell'applicazione della legge di propagazione della varianza, riferendosi al caso normale. Il secondo metodo riguarda l'impiego di un'equazione sperimentale ottenuta dalla letteratura (Kraus; 1994) che consente di stimare l'errore. Un terzo metodo viene utilizzato per stimare la precisione relativa nell'acquisizione stereoscopica di dati in fotogrammetria terrestre.

Il caso normale (Caso A), nella fotogrammetria, è un caso ideale in cui le prese vengono fatte con assi della camera perfettamente paralleli tra loro e perpendicolari alla base di presa. Questa è una condizione praticamente impossibile da verificarsi e si cerca quindi di avvicinarsi il più possibile ad essa.

Utilizzando tale metodo è possibile una semplificazione delle equazioni di collinearità, applicare la legge di propagazione della varianza e ottenere un valore atteso di scarto quadratico medio teorico di elevazione.

La formula utilizzata è la seguente:

$$\sigma_h = \left(\frac{h^2}{c \cdot B} \right) \cdot \sigma_{P\xi} \quad (2)$$

Dove:

h è la distanza di presa,

c è la lunghezza focale della camera,

B è la fotobase,

$\sigma_{P\xi}$ è l'errore sulla parallasse orizzontale pari a 10 μ m.

Gli errori possono anche essere stimati tramite il secondo metodo (B) con la seguente formula empirica (Kraus, 1994).

$$\sigma_h = a \cdot \frac{h}{1000} \quad (3)$$

Dove:

a è la costante empirica che varia da 0.1 a 0.15,

h è la distanza di presa.

Il terzo metodo (C) utilizzato impiega invece la seguente equazione:

$$\sigma_h = \frac{m_b}{4} \cdot 0,2 \text{ mm} \quad (4)$$

Dove m_b è il fattore di scala medio e 0,2 mm è l'errore di graficismo.

La quarta formula impiegata, cioè il caso D, è la seguente:

$$\sigma_h = \pm 0.06\% \times H_{rel} \text{ (N-GA)} \quad (5)$$

$$\sigma_h = \pm 0.08\% \times H_{rel} \text{ (SGA)}$$

In Tabella 18 vengono riportati i risultati ottenuti con questi quattro metodi appena descritti.

ACCURATEZZA		
$A) \sigma_h = \left(\frac{h^2}{c \cdot B} \right) \cdot \sigma_{P\xi}$	h alla base	0,02 m
	h in sommità	0,23 m
$B) \sigma_h = a \cdot \frac{h}{1000}$	h alla base (a=0,1)	0,002 m
	h alla base (a=0,15)	0,007 m
	h in sommità (a=0,1)	0,004 m
	h in sommità (a=0,15)	0,005 m
$C) \sigma_h = \frac{m_b}{4} \cdot 0.2 \text{ mm}$	h alla base	0,024 m
	h in sommità	0,075 m
D) c/d = 1 (NORMALE) $\sigma_h = \pm 0.06\% \times H_{rel}$	h alla base	0,001 m
	h in sommità	0,002 m

Tabella 18: Accuratezza calcolata con vari metodi per il modello tridimensionale.

Questi quattro differenti tipi di approccio per la valutazione dell'accuratezza sono di tipo teorico-sperimentale e danno valori fortemente differenti a seconda dell'approccio scelto. Infatti da come mostrato nella tabella descritta sopra si denota un errore che va da alcuni centimetri (caso A e C) ad alcuni millimetri (caso B e D).

Un'ulteriore passaggio è quello riferito al raddrizzamento della facciata con un'unica fotografia. L'ipotesi fondamentale è che l'oggetto sia piano per poter effettuare il foto raddrizzamento.

In questo caso il fattore di scala cambia in quanto il fotogramma è stato preso ad una distanza differente rispetto al caso per la formazione di una nuvola densa di punti.

La distanza di presa alla base della chiesa è pari a 25 m mentre la distanza in sommità è pari a 40 m.

Dunque il fattore di scala sarà pari a quello mostrato in Tabella 19.

FATTORE DI SCALA	
Alla base (h=25 m)	1042
In sommità (h=40 m)	1667

Tabella 19: Fattore di scala alla base e in sommità per il modello bidimensionale.

Un metodo per la valutazione dell'errore è quello che tiene conto del fattore di scala:

$$\sigma_h = \frac{m_b}{4} \cdot 0,2 \text{ mm} \quad (6)$$

Nel caso della chiesa di Santa Lucia l'oggetto non è piano e presenta delle sporgenze e delle rientranze che potrebbero causare un errore. Questo perché ogni punto presenta un oggetto, cioè una variazione di profondità sul piano immagine. Questa variazione è rappresentata da un segmento e l'errore è proporzionale alla profondità dell'oggetto stesso.

Un'ulteriore calcolo per valutare l'accuratezza del fotopiano è quello di determinare l'errore in dipendenza della variazione di profondità che caratterizza l'oggetto.

In Figura 175 viene mostrato ΔZ , cioè la variazione di profondità, $mb \cdot dr$, cioè l'errore presente sull'oggetto, dr , cioè l'errore presente sull'immagine, r è la distanza radiale del punto e c è la focale.

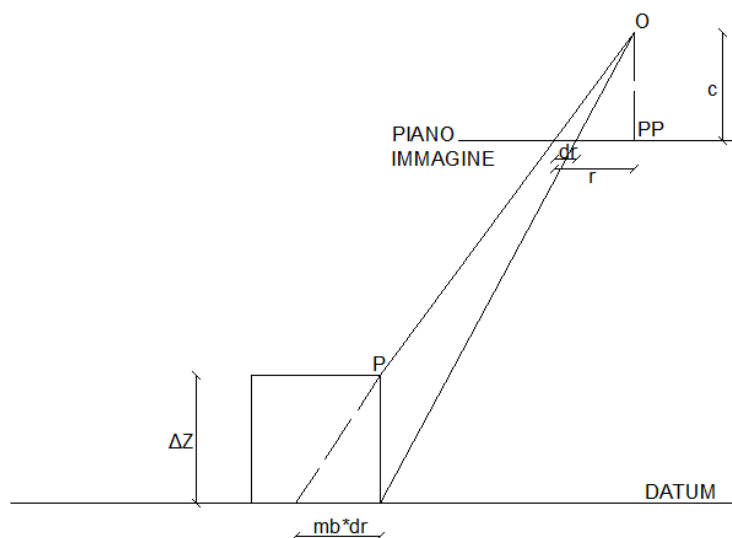


Figura 175: Rappresentazione dell'errore che viene introdotto ipotizzando l'oggetto piano.

Prima di procedere al calcolo dell'errore, sono state prese cinque profondità differenti. In Figura 176 vengono rappresentate le profondità della facciata: una alla base della facciata sulla parte più sporgente della colonna (viola), una leggermente meno sporgente rispetto a quella appena descritta (verde), una che rappresenta praticamente un piano (grigia), una a destra e a sinistra della facciata in alto nella parte più rientrante (giallo) e per ultima una porzione intermedia nella cima (rosso).

Il piano medio di riferimento è pari a circa -4 cm e corrisponde alla media delle z dei PFA utilizzati nel foto raddrizzamento. Le variazioni di profondità sono state calcolate rispetto a codesto piano.



Figura 176: Livelli di profondità della chiesa.

A queste profondità, le quali hanno altezze differenti, in Tabella 20 sono state calcolate le relative distanze di presa e i relativi fattori di scala.

ZONA	PROFONDITA'	DISTANZA DI PRESA MEDIA	FATTORE DI SCALA
Viola	2 m	25 m	1041.67
Verde	0.69 m	25 m	1041.67
Grigia	0.01 m	31 m	1291.67
Rossa	0.52 m	40 m	1666.67
Gialla	0.22 m	35 m	1458.33

Tabella 20: Profondità, distanza di presa e fattore di scala relativo alle cinque diverse rientranze.

Per determinare la distanza radiale del punto viene considerato il formato immagine 5472x3648 e si determina che $r=0.022$ m.

L'errore sull'oggetto $dr * m_b$ è così determinato:

$$dr * m_b = \frac{\Delta Z \cdot r}{c} \quad (7)$$

Dove ΔZ è la variazione di profondità, r è la distanza radiale del punto, c è la focale (0.024 m) e m_b è il fattore di scala.

In Tabella 21 viene riportata la stima teorica dell'errore. Anche in questo caso si hanno delle valutazioni di accuratezze distinte: una, la quale è legata dalla dimensione del pixel, che sottostima l'errore e un'altra, la quale dipende dalla variazione di profondità, che sovrastima l'errore.

ACCURATEZZA		
A) $\sigma_h = \frac{m_b}{4} \cdot 0,2 \text{ mm}$	Alla base	0.05 m
	In sommità	0.08 m
B) $dr * m_b = \frac{\Delta Z \cdot r}{c}$	Zona viola	1.83 m
	Zona verde	0.63 m
	Zona grigia	0.01 cm
	Zona rossa	0.48 m
	Zona gialla	0.20 m


Tabella 21: Accuratezza teorica del modello bidimensionale.

Nell'ambito di questa tesi vi è la possibilità di avere un datum, cioè un valore di riferimento, dato dalla nuvola densa di punti restituiti tramite l'uso del laser scanning. Quindi il modello laser in questo caso è un riferimento a valenza metrica che viene utilizzato per validare i prodotti tridimensionali e bidimensionali ottenuti con la fotogrammetria. Con la fotogrammetria si riescono ad ottenere nuvole di punti di notevoli dimensioni in modo abbastanza semplice ma che, tuttavia, possono creare problematiche in termini di tempo nelle successive fasi di analisi. Per capire l'importanza di questo passaggio successivo basti pensare ai possibili prodotti ottenibili, quali DSM, DTM, ortofoto.

Per la fotogrammetria è stato utilizzato un approccio automatico tridimensionale e un approccio manuale bidimensionale molto semplificato. Questi valori sono delle semplificazioni e per certi aspetti possono essere sottostimati o viceversa, quindi non sono molto attendibili in quanto non considerano tanti aspetti che possono avere causato errore nel modello tridimensionale. Lo scopo è dunque quello di determinare quale approccio teorico rappresenta meglio la validazione dell'errore in questo particolare caso di studio.

8.2 VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DEI PRODOTTI OTTENUTI

8.2.1 PRODOTTI TRIDIMENSIONALI

Dopo la pulizia delle nuvole, descritta precedentemente nel capitolo 7, sempre tramite il software ClouCompare, è stato determinato lo scostamento tra le nuvole e la densità dei punti di ciascuna nuvola tramite il comando *M3C2 Distance*  (Cloud Compare Manual), prendendo come nuvola di riferimento quella creata tramite il laser scanner terrestre.

L'algoritmo M3C2 (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) risulta molto utile in quanto opera direttamente sulle nuvole di punti, senza dover creare mesh o griglie e calcola direttamente la distanza locale tra due nuvole di punti lungo la direzione normale della superficie che ne segue le variazioni 3D (Lague et al.; 2013).

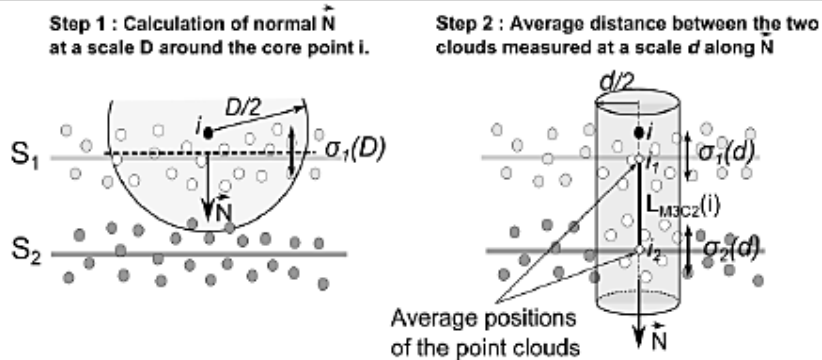
L'algoritmo è stato progettato per la misura accurata della distanza ortogonale tra due nuvole di punti e offre la possibilità di utilizzare la normale stimata sulla nuvola di riferimento. La scelta della normale è impostata dall'utente a seconda dell'applicazione.

L'algoritmo M3C2 lavora attraverso 3 step:

- Calcolo dei *core points*: utilizza un set di *core points* (per accelerare in modo significativo i calcoli) di cui si calcola la distanza e il relativo intervallo di confidenza. Questi punti vengono sotto-campionati rispetto alla nuvola di riferimento (*reference cloud*), con una distanza che per esempio può essere la distanza minima fra i punti. L'algoritmo tuttavia viene applicato ai dati grezzi riferiti a tutta la nuvola.
- Calcolo delle superfici normali (3D): per ogni *core point* il vettore normale viene calcolato per ogni nuvola inserendo un piano passante per i punti vicini di quella nuvola entro un raggio pari a $D/2$ (Figura 177) dove D è detta *scala normale*. Ogni normale è orientata positivamente rispetto all'orientamento fornito dall'utente. La deviazione standard della distanza dei punti vicini rispetto al piano di riferimento viene utilizzata come descrizione e misura della rugosità

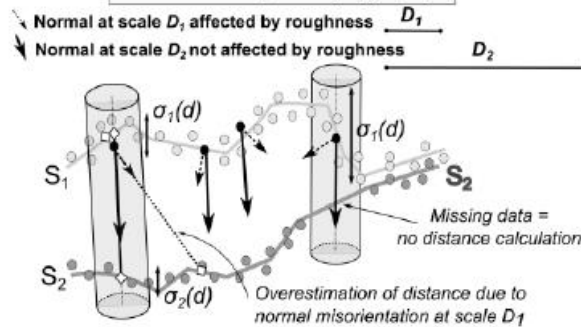
(σ , *detrended roughness*) della nuvola di punti. L'algoritmo permette di calcolare le normali anche rispetto alla nuvola sottocampionata per accelerare il calcolo pur mantenendo una buona accuratezza.

a Principle of the Multiscale Model to Model Cloud Comparison M3C2



a)

b M3C2 on complex topography



b)

Figura 177: Principio di funzionamento dell'algoritmo M3C2. Viene mostrato il principio dell'algoritmo M3C2 (a) in cui vengono rappresentati i due step: il calcolo della normale alla scala D attorno ai *core point* (step 1) e la media della distanza tra le due nuvole a scala d lungo la normale (step 2); e l'uso dell'algoritmo su una superficie complessa (b) (Lague et al; 2013).

- Calcolo della distanza tra le due nuvole di punti: una volta definita la normale al *core point* i , viene utilizzata per proiettare i su ogni nuvola di punti a scala d (chiamata *scala di proiezione*). Ciò equivale a definire la posizione media i_1 e i_2 in prossimità del *core point* i . Ciò avviene definendo un cilindro di raggio pari a $d/2$ il cui asse passa per i e che è orientato lungo il vettore normale. Viene impostata una dimensione massima del cilindro per velocizzare il calcolo. L'intersezione di ogni nuvola di punti con il cilindro definisce due sottoinsiemi con dimensioni n_1 e n_2 . Proiettando ciascuno dei sottoinsiemi sull'asse del cilindro ottengo le distribuzioni delle distanze con un'origine in i . La media delle

distribuzioni dà la posizione media della nuvola lungo la direzione normale i_1 e i_2 , e le due deviazioni standard permettono di stimare le rugosità locali (σ_1 e σ_2) lungo la direzione normale. La distanza locale tra le due nuvole di punti utilizzato questo algoritmo è quindi data dalla distanza tra i_1 e i_2 .

Questo algoritmo quindi calcola direttamente le **distanze fra due nuvole di punti** e, considerando che il piano della facciata in fotogrammetria è parallelo al piano xy, le deviazioni ricavate dalla comparazione delle due nuvole di punti ottenute sono gli scarti sulla z.

Dopo varie prove, si è deciso di lasciare i parametri di default proposti dal software, come nuvola di riferimento, in entrambi i confronti, è stata utilizzata quella del laser in quanto esso risulta avere la precisione migliore e, cambiando alcuni parametri della nuvola (cioè il colore e lo step della *Colore Scale* e i parametri della *SF display params*), il risultato ottenuto dal confronto tra il **Laser Scanning** e **Visual SfM** è quello mostrato in Figura 178.

Come ci si poteva aspettare l'errore minimo (dell'ordine del millimetro) è presente soprattutto alla base della facciata (colore verde) e man mano che aumenta la distanza tra camera-oggetto, quindi man mano che si va verso la sommità della facciata, l'errore aumenta fino all'ordine del centimetro (rosso).

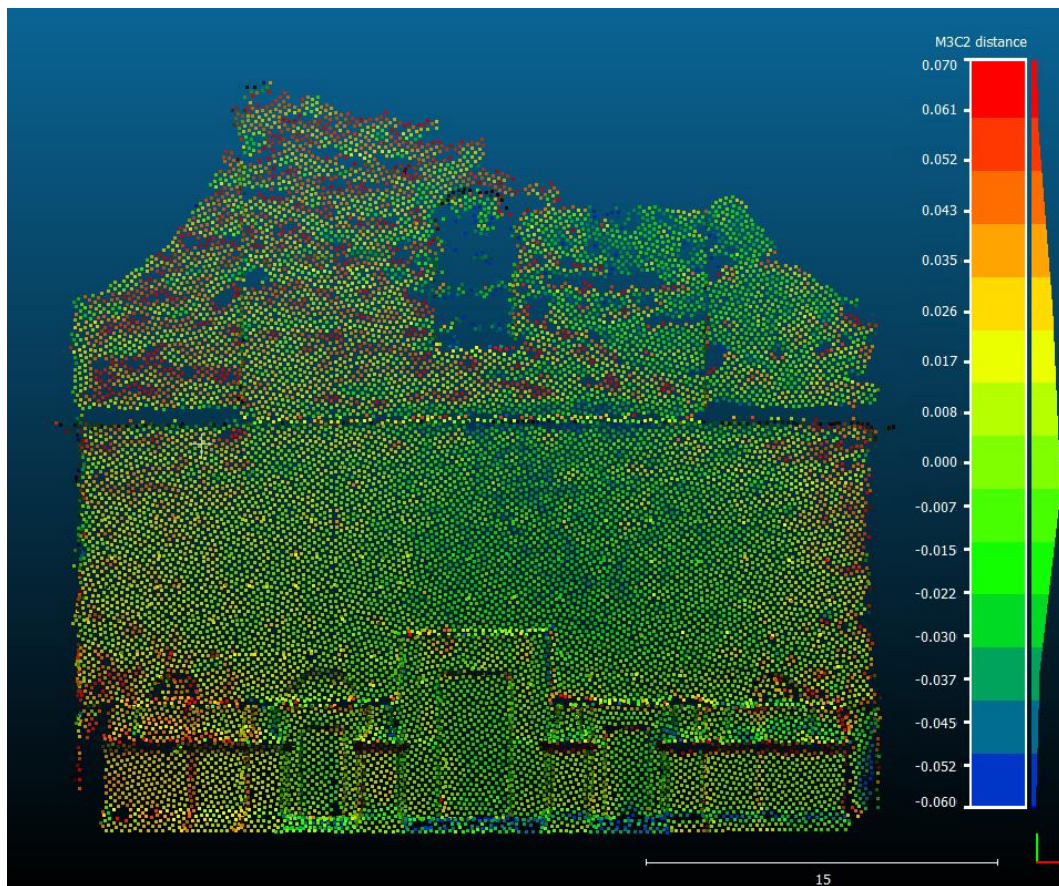


Figura 178: Calcolo della distanza tra le due nuvole di punti (Laser-Visual).

In Figura 179 si può identificare il fatto che il risultato ottenuto con Visual SfM è buono in quanto l'errore si aggira nell'intorno dello zero per la maggior parte della facciata (verde). Ma in Figura 180 viene rappresentato un *bias* ovvero un sistematismo di circa 15 mm che rientra nell'errore che caratterizza il rilievo stesso, poiché l'appoggio ha un errore di qualche mm con la dimensione del pixel del fotogramma questo aumenta di un ordine di grandezza. Dalla Tabella 11 non era stato riscontrato alcun tipo di sistematismo in quanto la media dei residui era pari a zero. Ma questo software ha la caratteristica di stimare i parametri di orientamento interno secondo un algoritmo non robusto, utilizza il modello di Brown (Brown; 1971) ma di esso stima un solo parametro: k_1 . Questo software risulta essere tanto rapido ma anche meno accurato e porta a deformazioni anomale. L'utilizzo di immagini rettificate attraverso la stima debole dei parametri di orientamento interno non ha eliminato il problema.

In conclusione questo errore è presente attraverso un sistematismo dovuto all'uso del software ma rientra nei termini di accettabilità (il campo di accettabilità è il verde che è nell'ordine del cm).

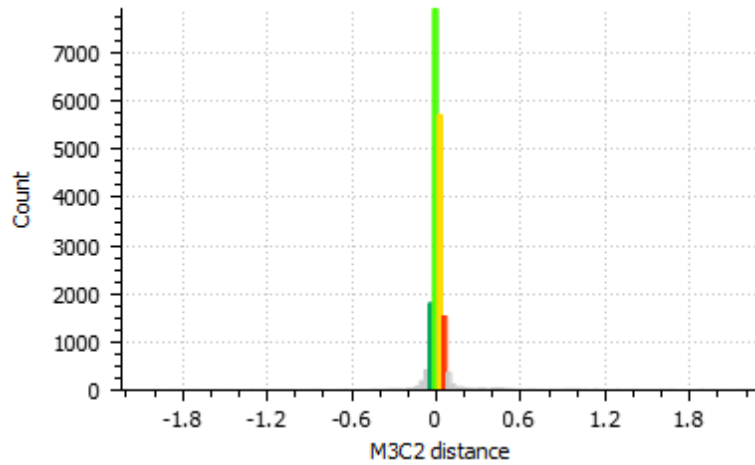


Figura 179: Istogramma delle frequenze. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che il maggior numero di zone è caratterizzato dal colore verde (cioè un errore nell'ordine del millimetro), una buona parte è caratterizzata dal colore giallo (cioè nell'ordine del centimetro) mentre le zone blu e rosse (cioè nell'ordine di qualche centimetro) caratterizzano zone molto inferiori rispetto a quelle precedentemente descritte.

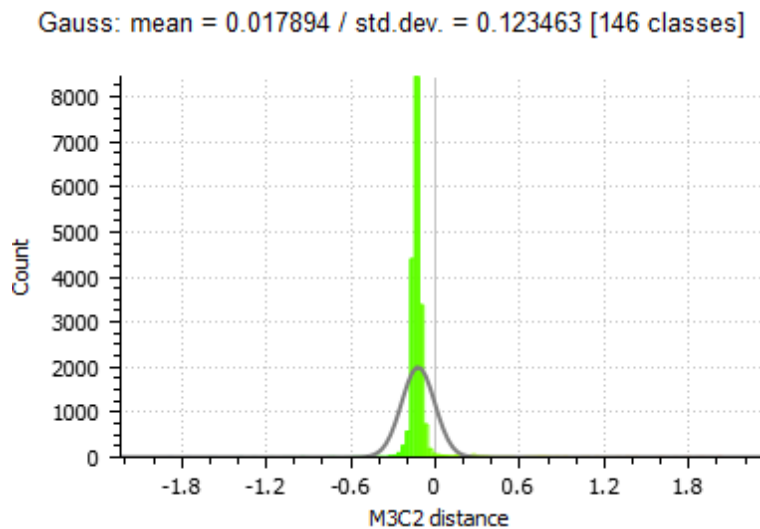


Figura 180: Distribuzione Gaussiana. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è la presenza di un *bias* pari a 15 mm.

Come mostrato in precedenza, nella Tabella 11, il residuo trovato, di circa 5 cm, tramite la georeferenziazione di Visual SfM è causato dalla georeferenziazione complessiva dei punti. Confrontando i risultati ottenuti con il dato laser gli errori sono anche nell'ordine del mm. Quindi quei 5 cm inizialmente determinati sono causati da un errore di georeferenziazione che però certifica il fatto che i punti sono congruenti alle immagini e che la procedura di scalatura e orientamento è andata a buon fine.

Lo stesso calcolo è stato eseguito per il confronto tra il **Laser Scanning** e il software **Agisoft Photoscan** e il risultato ottenuto è quello mostrato in Figura 181.

In questo caso non è presente un sistematismo (Figura 183) ma sembrerebbe che ci sia una rotazione della facciata (Figura 181) ottenuta tramite Agisoft in quanto nella parte sinistra è presente un errore positivo (rosso) e nella parte destra è negativo (blu).

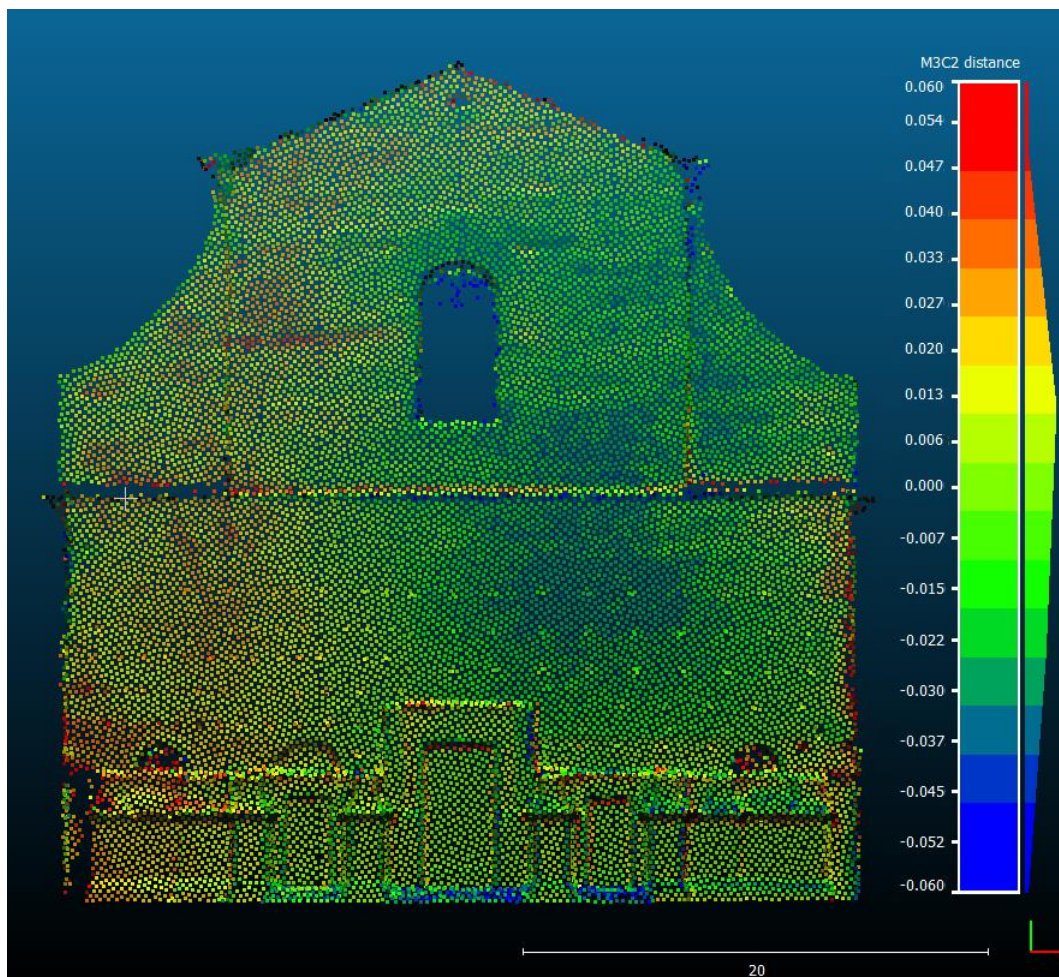


Figura 181: Calcolo della distanza tra le due nuvole di punti (Laser-Agisoft).

Anche attraverso il software Agisoft , si può identificare il fatto che il risultato ottenuto è buono in quanto, in Figura 182, l'errore si aggira nell'intorno dello zero per la maggior parte della facciata (verde).

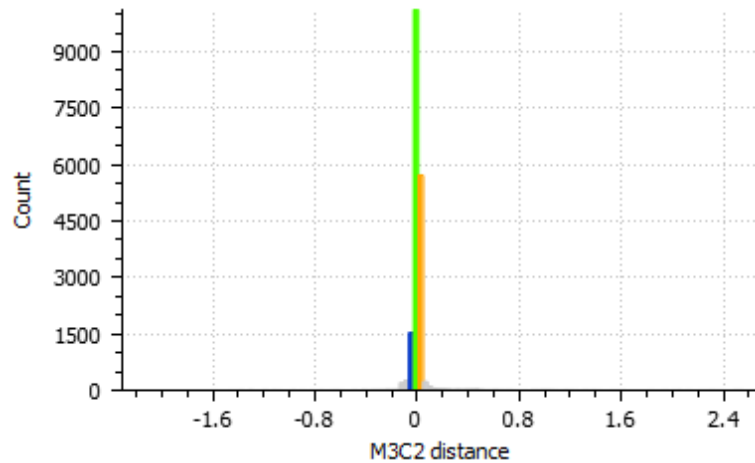


Figura 182: Istogramma delle frequenze. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che il maggior numero di zone è caratterizzato dal colore verde (cioè un errore nell'ordine del millimetro), una buona parte è caratterizzata dal colore arancio (cioè nell'ordine del centimetro) mentre la zone blu (cioè nell'ordine di qualche centimetro) caratterizza zone molto inferiori rispetto a quelle precedentemente descritte.

Gauss: mean = 0.006914 / std.dev. = 0.110872 [137 classes]

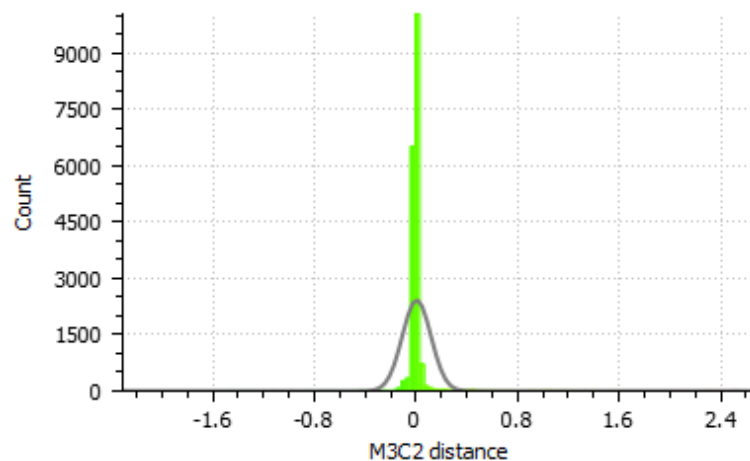


Figura 183: Distribuzione Gaussiana. Nelle coordinate viene identificata la distanza che intercorre tra le due nuvole mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Da notare è il fatto che non ci sia la presenza di un *bias* come accaduto con il software open source.

Un ulteriore studio delle nuvole è stato di quello di capire quanti **punti** sono stati restituiti tramite il laser scanner e la fotogrammetria attraverso i due software utilizzati, quali Agisoft Photoscan e Visual SfM.

Dai risultati ottenuti si evince che le nuvole ottenute con tutti i diversi sistemi sono costituite da una mole maggiore di punti alla base che si dirada man mano che si raggiunge la sommità della facciata. Questo fatto era facilmente intuibile in quanto, sia per quanto riguarda la fotogrammetria sia il laser scanner terrestre, le prese fotogrammetriche e le scansioni laser sono state effettuate da terra.

La nuvola di punti ottenuta con il **Laser** (Figura 184) è quella migliore in quanto il numero massimo di punti (rosso), presente alla base della facciata, è di circa 60000 punti.

La nuvola di punti ottenuta tramite il software open source **VisualSfM** (Figura 186) è più scarna rispetto a quella ottenuta tramite il laser in quanto il massimo di punti presenti con Visual SfM sono alla base e se ne contano circa 5000 contro i punti ottenuti dal laser cioè circa 60000. Questo dimostra che tramite Visual SfM non sono stati restituiti i punti nella parte di sommità della facciata. Quindi la nuvola ottenuta con il laser risulta la migliore, caratterizzata da un numero elevato di punti e distribuzione di densità più uniforme rispetto a quello ottenuto con VisualSfM.

La nuvola di punti ottenuta tramite il software commerciale **Agisoft Photoscan** (Figura 188) è più scarna rispetto a quella ottenuta tramite il laser in quanto il massimo di punti presenti con il software commerciale sono alla base e se ne contano circa 12000 contro i punti ottenuti dal laser cioè circa 60000, ma è migliore rispetto al massimo di 5000 punti ottenuti tramite il software open source. Questo dimostra che tramite Agisoft Photoscan la restituzione di punti è buona anche se le prese sono state effettuate solo da terra e, a causa di occlusioni prospettiche, alcune porzioni della facciata colorate in giallo-verde non sono state proprio restituite. Quindi, per quanto riguarda la mole di punti è migliore senz'altro il laser anche se la distribuzione risulta più uniforme nel caso della fotogrammetria.

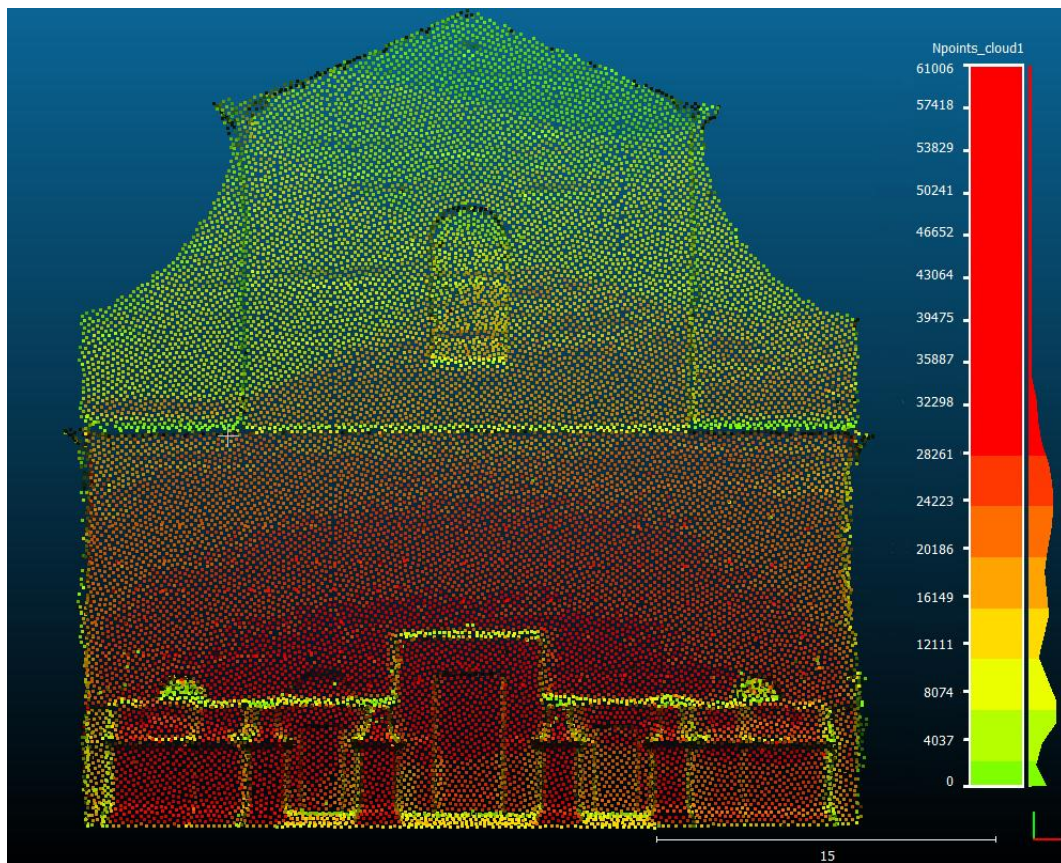


Figura 184: Numero punti ottenuti con il Laser. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti.

In Figura 185 viene mostrata la frequenza con cui sono stati restituiti i punti tramite il Laser Scanning. Viene evidenziato il fatto che la mole di punti fino a 40000 è alta mentre le zone in cui si hanno 60000 punti sono poche.

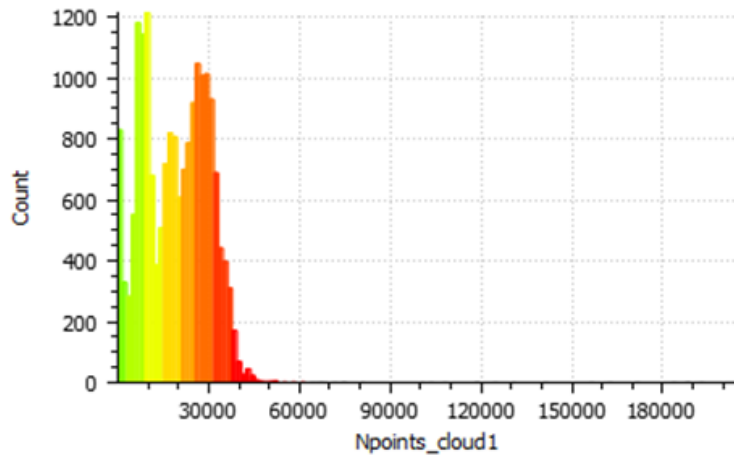


Figura 185: Frequenza dei valori ottenuti con il Laser. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che la mole di punti fino a 4000 è alta mentre le zone in cui si hanno 6000 punti sono poche.

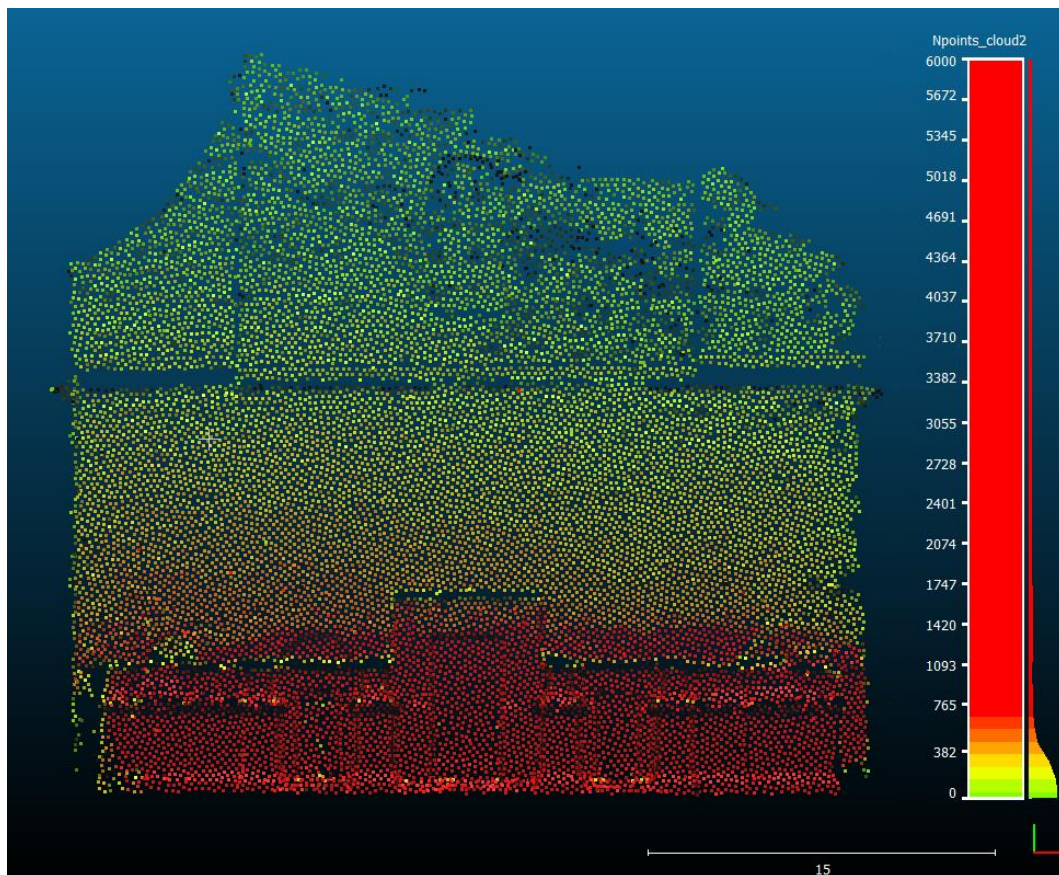


Figura 186: Numero punti ottenuti con Visual SfM. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti. In questo caso sono presenti delle zone dove non c'è la presenza di punti (soprattutto nella sommità).

In Figura 187 invece si può notare che tramite il software open source la maggior parte della zona della facciata è caratterizzata da pochi punti (circa 1000) mentre le zone della facciata che restituiscono molti più punti (dai 3000 fino ai 6000 punti) sono assai scarse.

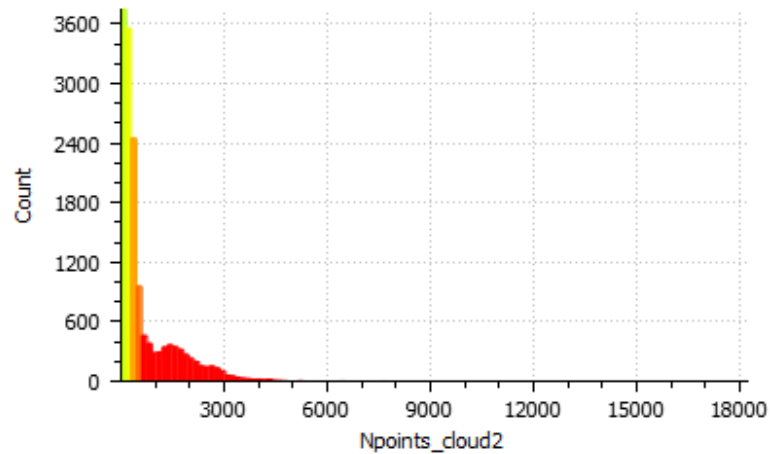


Figura 187: Frequenza dei punti ottenuti tramite VisualSfM. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che la mole di punti fino a 1000 è alta mentre le zone in cui si hanno 3000 punti sono poche.

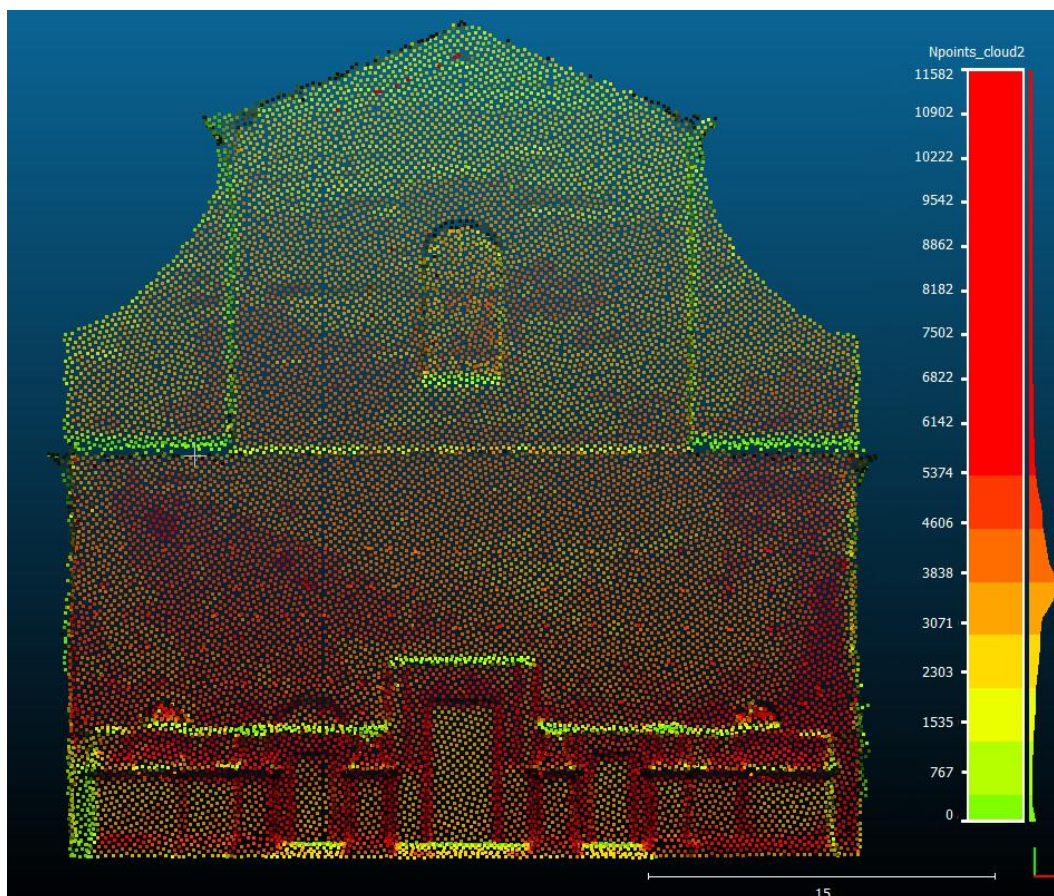


Figura 188: Numero punti ottenuti con Agisoft Photoscan. Il colore rosso mostra la zona con una quantità maggiore di punti, la parte gialla mostra una zona intermedia e la parte in verde mostra la zona con meno punti presenti.

Tramite il programma commerciale si ottiene che, come mostrato in Figura 189 le zone in cui i punti sono praticamente assenti sono molto poche (queste zone sono causate dalle oclusioni prospettive dovute al fatto che la geometria di presa non è stata eseguita *ad hoc*) mentre la maggior parte della facciata presenta un range di punti che va dai 1500 ai 2000 punti fino a porzioni di 12000 punti che sono assai scarse e corrispondono alla base della facciata.

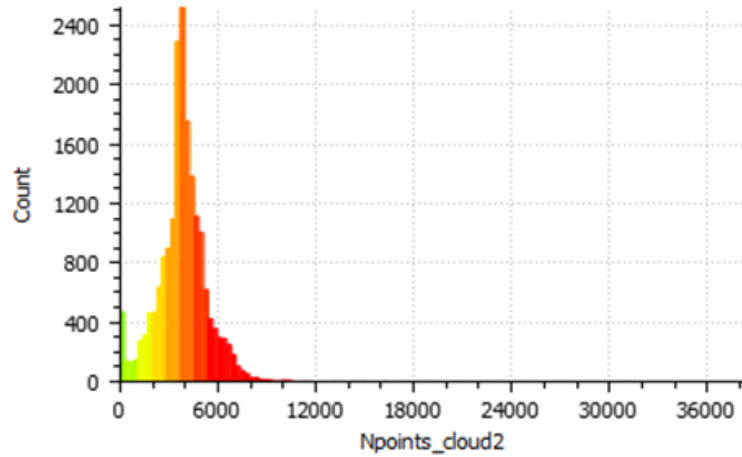


Figura 189: Frequenza di punti ottenuti con Agisoft Photoscan. Nelle coordinate viene identificata il numero di punti presente mentre nelle ordinate viene identificata la frequenza con cui il dato si presenta. Si nota la che le zone in cui si hanno pochi punti sono scarse, la zona in cui la mole di punti è pari a 2000 è alta mentre le zone in cui si hanno 6000 punti sono poche.

Un ultima analisi consiste nell'estrapolazione di **sezioni orizzontali e verticali** da ciascuna nuvola di punti tramite Cloud Compare, il quale è in grado di estrarre sezioni e profili e di seguito, in Figura 190, si mostra dove sono state eseguite le sezioni di dettaglio.

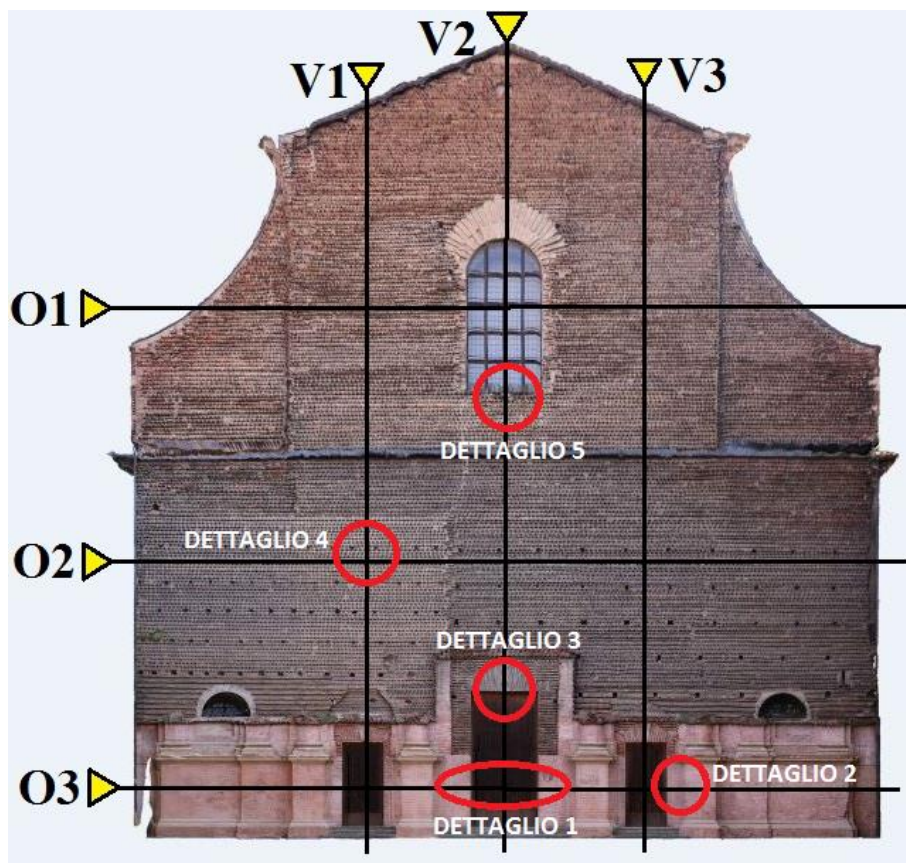
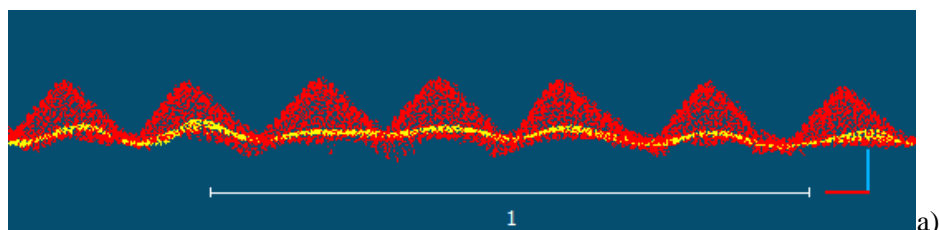


Figura 190: Inquadratura sezioni e particolari.

Prendendo come riferimento la nuvola ottenuta con la scansione laser, la quale rispetta al meglio la realtà, di seguito vengono riportati alcuni particolari evidenziati sopra.

Nelle figure che verranno mostrate i punti in rosso mostrano il risultato ottenuto tramite il **Laser Scanning** mentre i punti in giallo rappresentano il risultato ottenuto con **Agisoft Photoscan**.

In Figura 191 si evince come i mattoni disposti a “dente di sega” della facciata con il laser scanning vengano perfettamente restituiti, riuscendo quindi a cogliere la profondità e la presenza di tali sporgenze, mentre con Agisoft i cunei non vengono ritrovati ma semplicemente la facciata viene rappresentata in maniera ondulata.



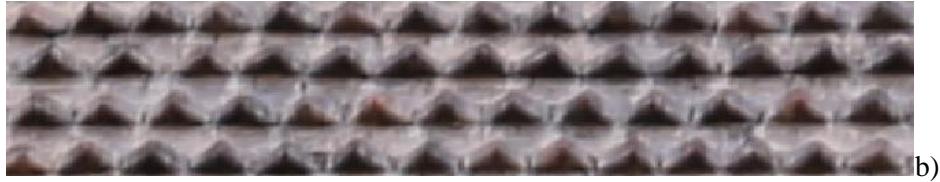


Figura 191: Sezione O2, dettaglio 4 della sezione O2 (a) e immagine dell'oggetto reale (b).

In Figura 192 e in Figura 193 si vuole sottolineare il fatto che sia il laser che la fotogrammetria non sono affetti da rumore, soprattutto nella parte inferiore della facciata, infatti i punti sono esattamente uno sopra l'altro ma in questo caso il problema viene trovato nel Laser in quanto presenta degli artefatti. Come si può notare dalle figure sottostanti, a causa di occlusioni prospettive il laser crea delle parti, soprattutto negli spigoli, che non esistono nella realtà. Questo suo lato negativo potrebbe inficiare sulla bontà del risultato ottenuto provocando quindi un errore.

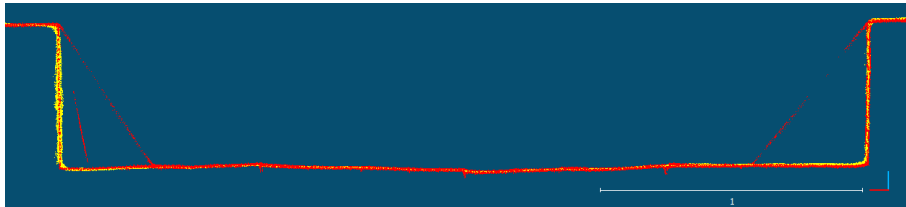


Figura 192: Sezione O3, dettaglio 1. Visualizzazione degli artefatti creati tramite il laser (rosso).

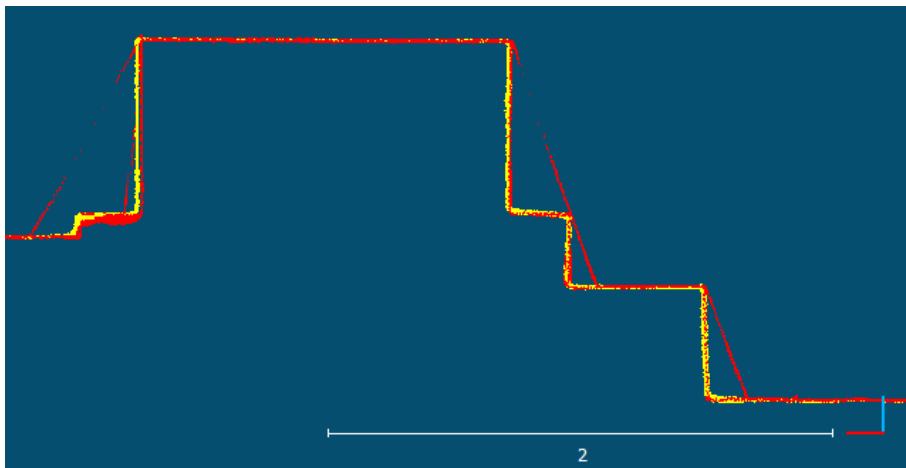


Figura 193: Sezione O3, dettaglio 2. Visualizzazione degli artefatti creati tramite il laser (rosso).

In Figura 194 viene mostrata una sezione della finestra in alto centrale e viene rimarcato il fatto che il laser riesce a rappresentare esattamente la profondità e l'esistenza dei

cunei e anche, per entrambe le tecnologie, riescono a rappresentare la profondità della finestra.

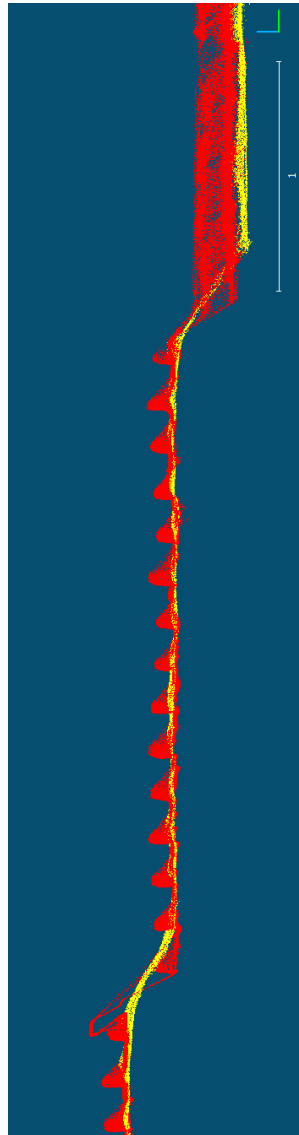


Figura 194: Sezione V2, dettaglio 5. Visualizzazione dei mattoncini perfettamente restituiti con il laser (rosso) e della rientranza della finestra rappresentata anche tramite la fotogrammetria (giallo).

Infine, in Figura 195, viene mostrato come la precisione del laser riesca a cogliere un dettaglio, quale il porta lanterna in ferro di diametro di 2 cm che indica la posizione dell'ingresso principale, presente sopra al portone principale mentre con Agisoft Photoscan questo non viene presentato.



Figura 195: Sezione V2, dettaglio 3 (a) e immagine dell'oggetto reale (b).

Le stesse sezioni sono state effettuate con il software Visual SfM e, in questo caso i punti in nero mostrano il risultato ottenuto tramite il **Laser Scanning** mentre i punti in giallo rappresentano il risultato ottenuto con **Visual SfM**.

A parte i relativi giudizi del laser che valgono anche in queste sezioni, il software open source ha restituito in sommità (Figura 196) pochi punti rispetto al laser e non rappresenta la realtà, ovvero i mattoni inclinati presenti sulla facciata non vengono rappresentati. In Figura 197 e in Figura 198 Visual SfM non provoca degli artefatti, come avviene nel laser, ma i punti restituiti sono affetti da rumore e le parti rettilinee proprie delle colonne non vengono rappresentate al meglio. In Figura 199 (a) viene sottolineato il fatto che Visual SfM non rappresenta i mattoni a dente di sega ma che crea una superficie ondulata e con una mole di punti molto inferiore rispetto al laser ed infine, in Figura 199 (b), come accaduto con il software commerciale, il porta lanterna del portone principale in ferro, con il software open source non viene rappresentato.

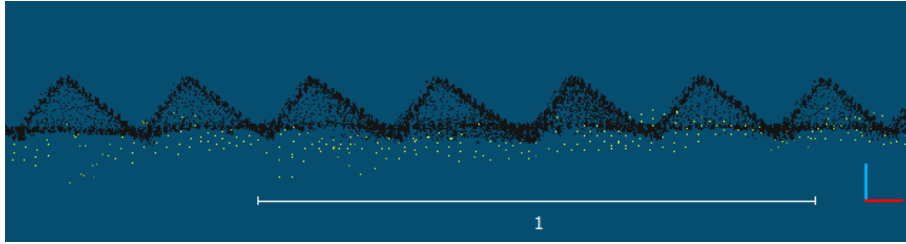


Figura 196: Sezione O2, dettaglio 4.

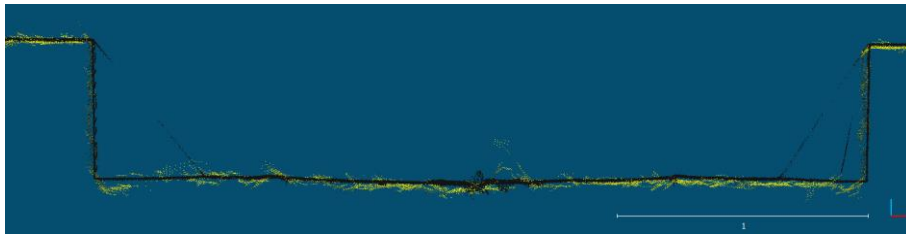


Figura 197: Sezione O3, dettaglio 1.

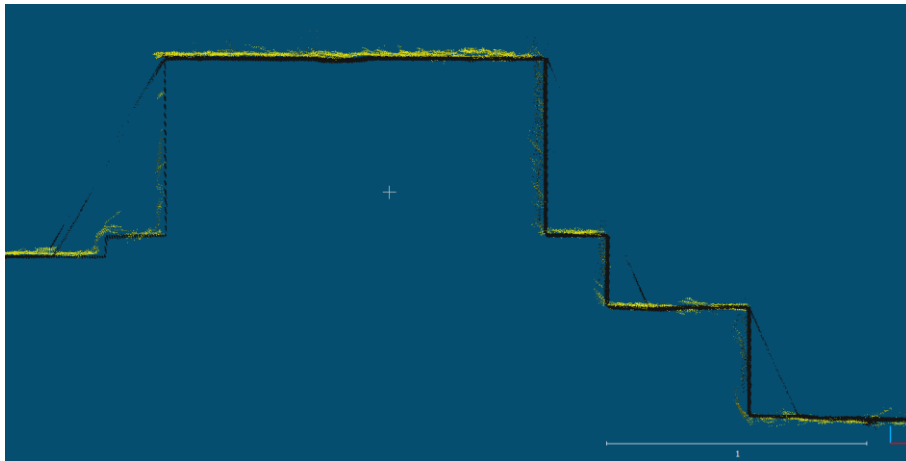


Figura 198: Sezione O3, dettaglio 2.

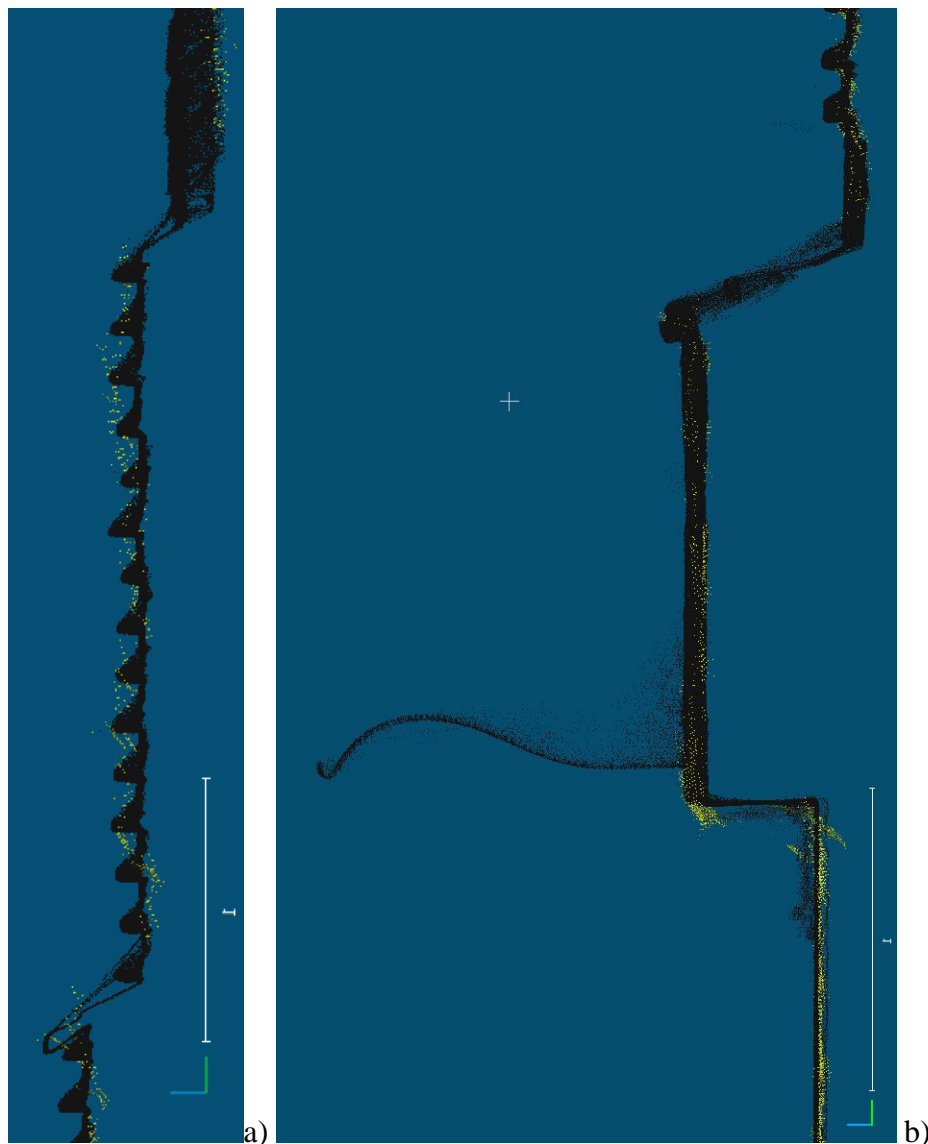


Figura 199: Sezione V2, dettaglio 5 (a) e sezione V2, dettaglio 3 (b).

I modelli tridimensionali ottenuti con la fotogrammetria sono stati realizzati utilizzando algoritmi di correlazione automatica. L'algoritmo di correlazione automatica non sempre funziona e il risultato dipende dalla geometria di presa, dalla distanza di presa e dalla ridondanza. Il problema fondamentale per la correlazione di immagini digitali è l'identificazione di punti omologhi e questi sono poco identificabili se già le immagini di partenza presentano cambiamenti di illuminazione, presenza di rumore, sfocature e se non vi è ridondanza minima tra le prese effettuate.

La geometria di presa non è esaustiva per questo tipo di oggetto in quanto è stato utilizzato un rilievo speditivo e rapido e questo comporta che in certe zone abbiamo un

problema legato all'occlusione prospettica. In verità l'occlusione prospettica riguarda anche il dato laser, essendo anch'esso preso da terra, ma questo ha un'accuratezza maggiore anche se in certe zone provoca degli artefatti, cioè errori, molto importanti.

I residui ottenuti tramite il confronto con i Laser Scanning ha denotato essenzialmente degli errori in un intorno più basso rispetto a quelli stimati teoricamente. Cioè, nonostante non si sia realizzato un rilievo *ad hoc*, cioè fotogrammetrico nato per il rilievo della facciata, ma speditivo a basso costo con macchine non fotogrammetriche e con un approccio non rigoroso, le differenze nel complesso sono più basse rispetto a quelle che ci si poteva attendere tramite il calcolo teorico degli errori.

Non tutti gli algoritmi di correlazione automatica sono soddisfacenti in quanto, utilizzando due software differenti che implementano algoritmi simili, si è dimostrato che i risultati sono molto differenti. Questa situazione è legata però essenzialmente ai tre punti di prima perché l'efficacia dei prodotti è dimostrata dalla qualità del risultato che si ha alla base (la geometria di presa, il fattore di scala, il ricoprimento e l'appoggio sono elementi che caratterizzano la soluzione).

In conclusione, in base al calcolo dell'errore teorico e quello che è stato dedotto sperimentalmente tramite il confronto tra la fotogrammetria e il laser scanning (Tabella 18), il calcolo più attendibile in questo caso di studio è il caso C per quanto riguarda la parte sommitale della facciata ovvero la determinazione dell'errore che prende in considerazione il fattore di scala e l'errore di graficismo, mentre, per quanto riguarda il resto della facciata, soprattutto per la parte alla base, l'errore si avvicina al valore del GSD.

8.2.2 PRODOTTI BIDIMENSIONALI

Per poter valutare l'accuratezza del prodotto ottenuto sono state calcolate delle distanze su punti omologhi e confrontate con le distanze reali prendendo come coordinate i punti del laser scanning.

La posizione dei punti sono mostrati in Figura 200, il particolare di questi sono mostrati in Figura 201 e le coordinate dei *check point* in Tabella 22. Questo primo calcolo è stato fatto per stimare e caratterizzare la reale deformazione del raddrizzamento creato.

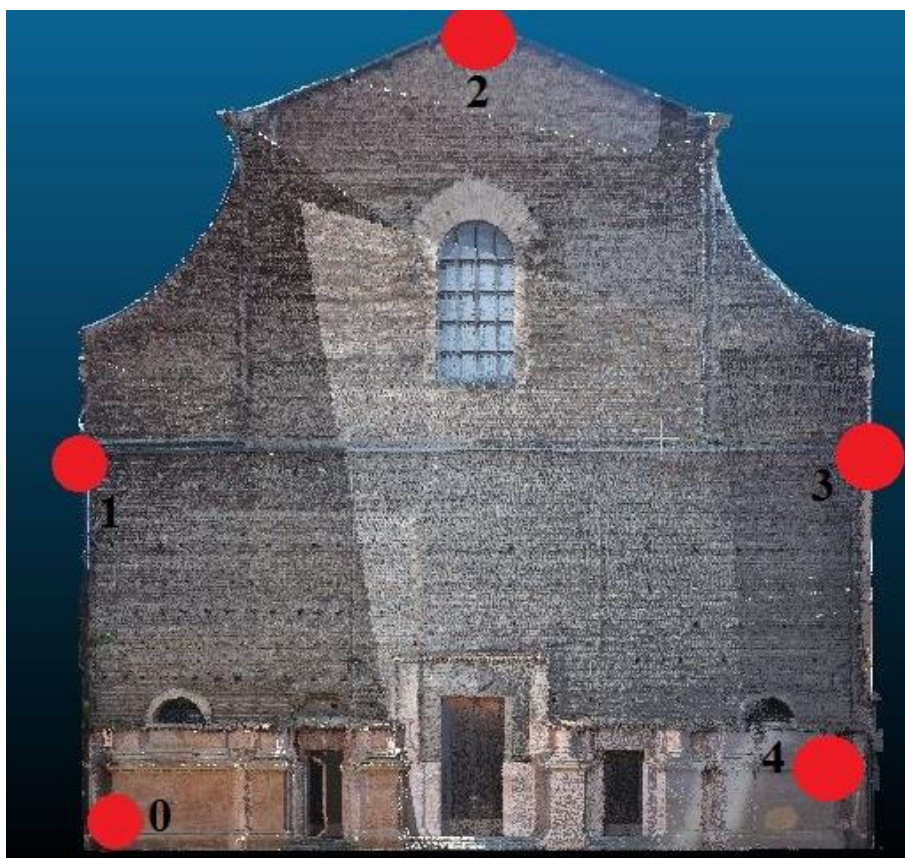


Figura 200: Posizione approssimata dei punti che servono per la valutazione dell'accuratezza del prodotto ottenuto.

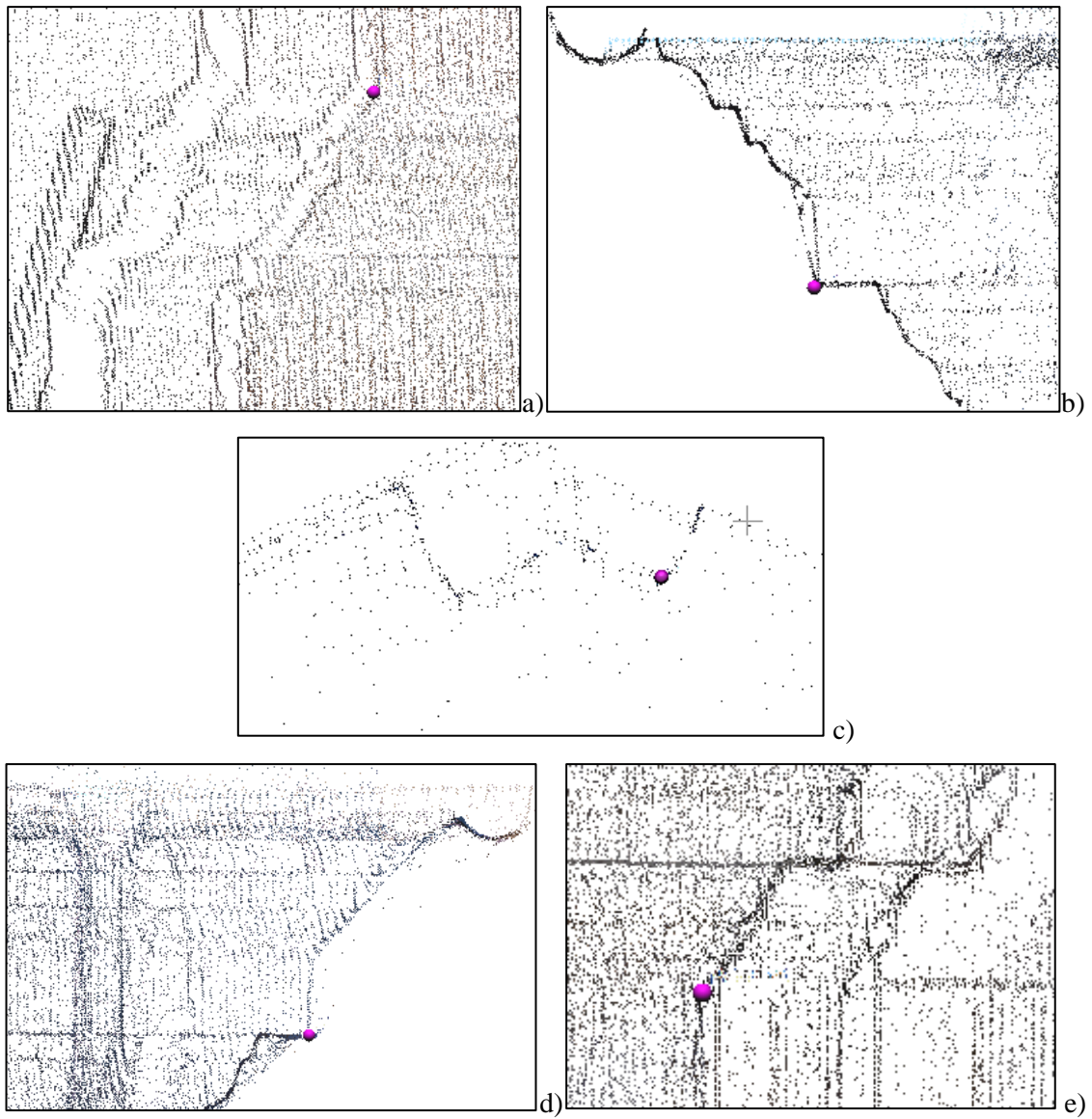


Figura 201: Monografia dei *check point*: punto 0 (a), punto 1 (b), punto 2 (c), punto 3 (d), punto 4 (e).

PUNTI	COORDINATE		
	X	Y	Z
0	-15.98	-11.94	0.65
1	-17.73	4.1	0.02
2	-0.13	23.03	-0.13
3	17.17	4.02	0.01
4	15.43	-9.45	0.6

Tabella 22: Coordinate dei check point.

Successivamente in Tabella 23 sono state calcolate le distanze 3D, tramite le coordinate dei punti ottenuti dal dato laser, le distanze 2D ottenute direttamente sul raddrizzamento e i residui, cioè le differenze di tali distanze (Figura 202).



Figura 202: In arancio vengono mostrate le distanze trovate direttamente sul foto raddrizzamento.

	Distanza 3D (m)	Distanza 2D (m)	DIFFERENZE (m)
P0-P1	16.14	16.19	0.05
P0-P2	38.41	38.65	0.24
P0-P3	36.8	36.96	0.16
P0-P4	31.51	31.89	0.38
P1-P2	25.85	25.94	0.09
P1-P3	34.89	34.94	0.05
P1-P4	35.82	35.97	0.15
P2-P3	25.7	25.72	0.02
P2-P4	36	36.07	0.07
P3-P4	13.6	13.62	0.02

Tabella 23: Distanze e residui

Infine è stata calcolata l'altezza e la larghezza massima della facciata della chiesa di Santa Lucia dalla nuvola ottenuta tramite il laser e il fotopiano (Tabella 24).

LASER		FOTOPIANO		DIFFERENZE
ALTEZZA	36.4 m	ALTEZZA	36.46 m	0.06 m
LARGHEZZA	35.79 m	LARGHEZZA	36.3 m	0.51 m

Tabella 24: Misure di altezza e larghezza della facciata.

Dai dati reperiti sembrerebbe che l'immagine si sia ingrandita, sia in larghezza che in altezza, ma soprattutto in larghezza. Nella parte destra e sinistra della facciata, nella distanza P0-P1 e P3-P4, si è raddrizzata quasi perfettamente in quanto l'errore è nell'ordine del millimetro, mentre l'errore massimo viene visto nella parte in basso della facciata, in cui, attraverso il calcolo del residuo nei punti P0-P4, la facciata si sarebbe allargata di circa 40 cm.

La statistica ottenuta dal calcolo delle distanze è quella mostrata in Tabella 25.

VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO	MEDIA	SCARTO QUADRATICO MEDIO
0.02 m	0.38 m	0.12 m	0.11 m

Tabella 25: Stima dei valori massimi e minimi, della media e dello scarto quadratico medio.

Questi tipi di errori potrebbero essere causati dal fatto che la fotografia è stata scattata in modo molto prospettico in quanto la morfologia del territorio davanti alla facciata non poteva prevedere un fotogramma migliore di quello, poiché, davanti alla chiesa, c'è un portico che non permette di fare fotografie perché una gran parte della facciata, sia in altezza che in larghezza non veniva visualizzata. Per questo motivo la fotografia è stata eseguita molto più a destra rispetto alla facciata stessa.

Un altro problema potrebbe essere il fatto che la facciata presenta dei piani con sporgenze molto differenti. Essendo che il raddrizzamento ottenuto con un solo fotogramma è stato fatto con l'ipotesi che l'oggetto fosse piano, ma tale oggetto, avendo anche sporgenze di alcuni metri, alla base del prospetto, non è del tutto piano. Per questo motivo, anche se il raddrizzamento è stato appoggiato con tanti punti di appoggio (questo è stato fatto grazie al datum laser in quanto senza questo sarebbe stato molto dispendioso e impegnativo), esso potrebbe essere afflitto da errori che dipendono appunto dalla profondità che hanno. A tale scopo sono state calcolate delle distanze verticali e orizzontali, sempre grazie al dato laser, complanari cioè distanze di punti che giacciono sullo stesso piano.

Questo studio è stato fatto anche perché già dalla Tabella 23 si denota questo problema in quanto distanze appartenenti al piano affetto da una certa profondità (P0-P1) sono affette da residui maggiori rispetto ad altre che appartengono a zone molto meno sporgenti (P1-P3).

Per poter eseguire il calcolo sono stati presi 14 punti la cui posizione è mostrata in Figura 203, il loro particolare per la monografia è mostrato in Figura 204, Figura 205, Figura 206, Figura 207 e in Figura 208 e in Tabella 26 vengono riportate le loro coordinate.



Figura 203: Distribuzione dei punti su cinque livelli differenti della facciata.





Figura 204: Monografia dei punti 0 (a), 1 (b) e 2 (c) che appartengono ad un piano pari a 2 metri circa di sporgenza.

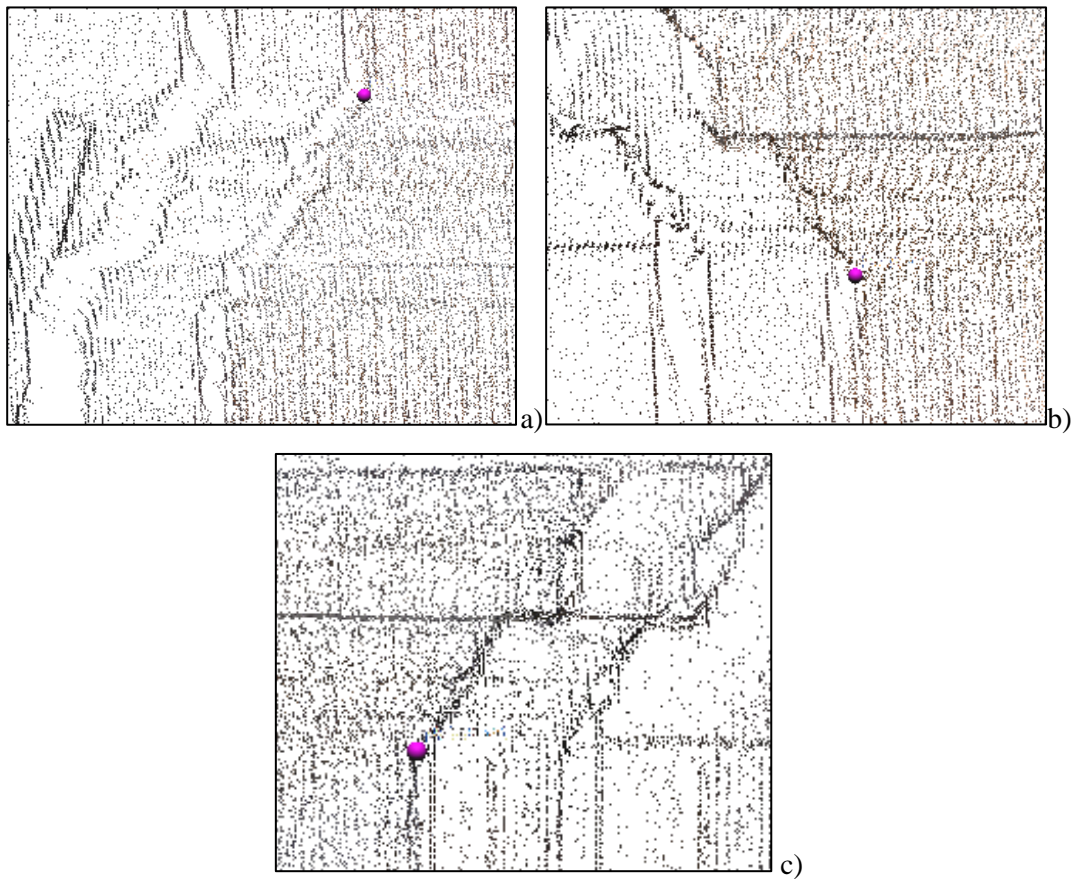


Figura 205: Monografia dei punti 3 (a), 4 (b) e 5 (c) che appartengono ad un piano pari a 0.7 cm circa di sporgenza.

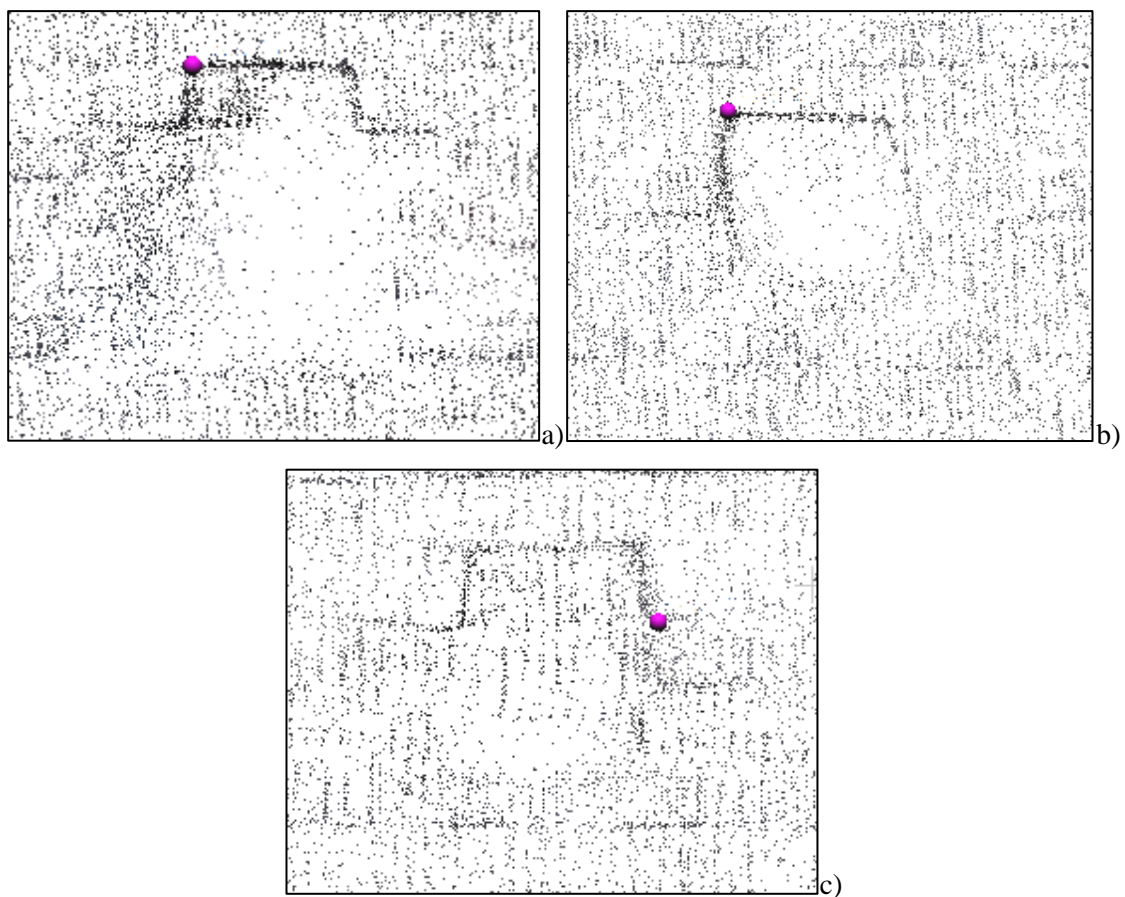
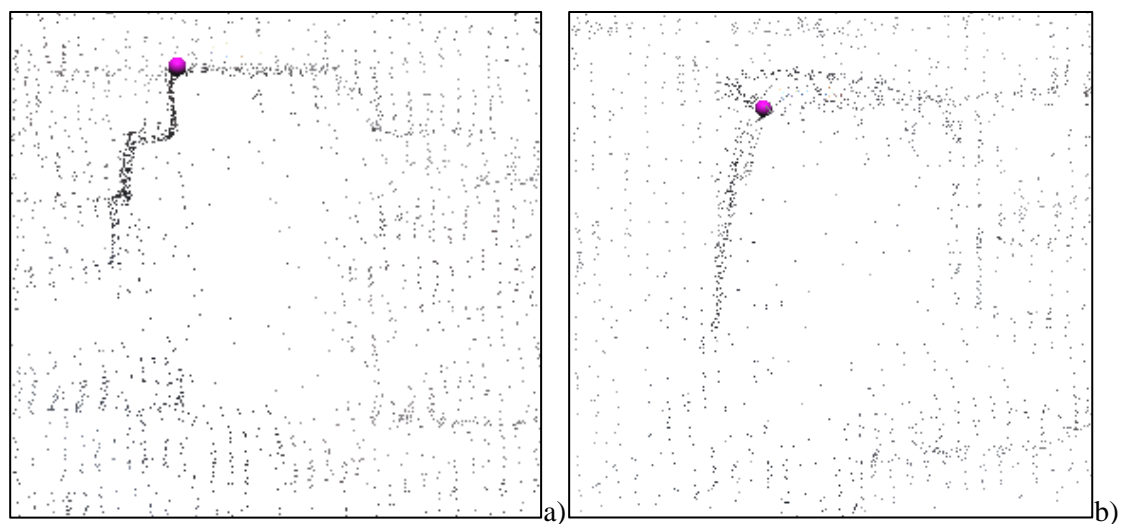


Figura 206: Monografia dei punti 6 (a), 7 (b) e 8 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.05 cm circa di sporgenza.



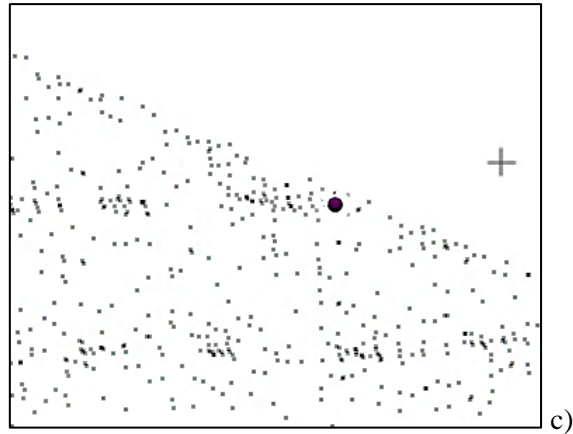


Figura 207: Monografia dei punti 9 (a), 10 (b) e 11 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.27 cm circa di sporgenza.

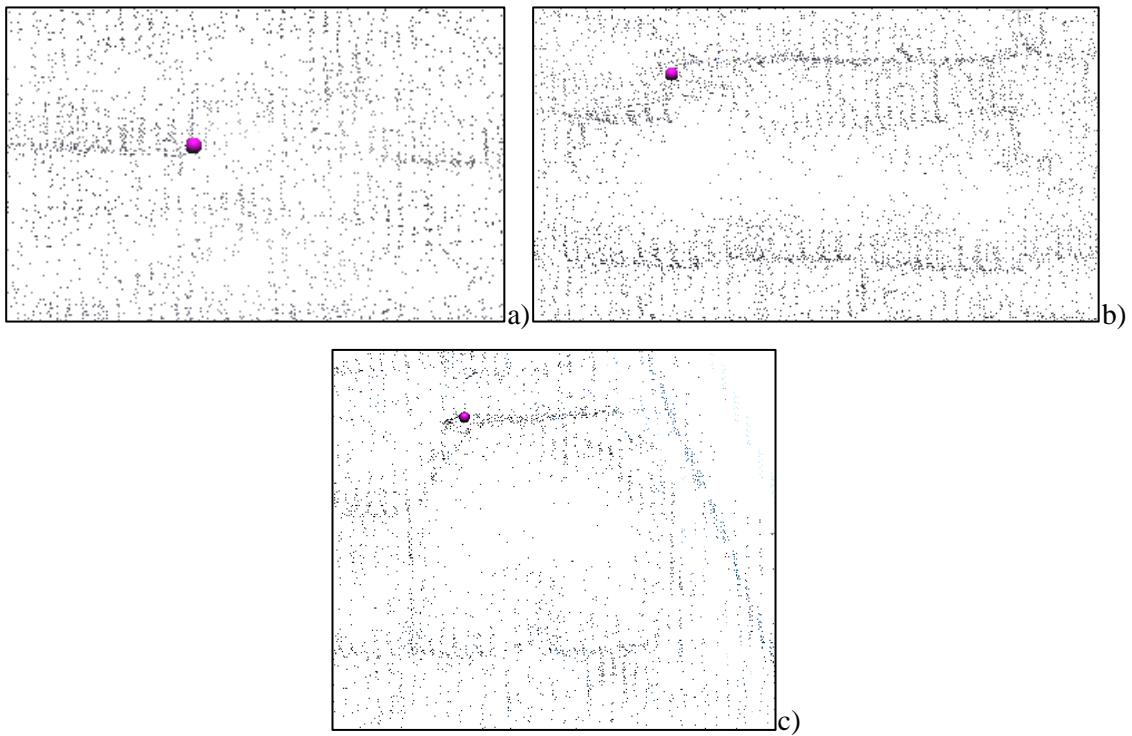


Figura 208: Monografia dei punti 12 (a), 13 (b) e 14 (c) che appartengono ad un piano pari a -0.6 cm circa di sporgenza.

PUNTI	COORDINATE (m)		
	X	Y	Z
0	-3.31	-9.07	2.21
1	-3.36	-12.63	2.18
2	4.71	-9.03	2.24
3	-15.98	-11.94	0.64
4	-15.98	-9.45	0.66
5	15.43	-9.46	0.61
6	-16.32	2.33	-0.05
7	-16.13	-2.35	-0.05
8	13.18	-3	-0.05
9	-3.27	15.33	-0.26
10	2.08	15.25	-0.28
11	2.37	22.01	-0.29
12	11.44	6.45	-0.69
13	15.48	6.42	-0.68
14	10.21	15.11	-0.63

Tabella 26: Coordinate dei punti.

Successivamente sono state calcolate le distanze 3D per ogni livello di profondità, tramite le coordinate dei punti ottenuti dal dato laser, le distanze 2D ottenute direttamente sul raddrizzamento e i residui di tali distanze (Tabella 27).

	Distanza 3D (m)	Distanza 2D (m)	DIFFERENZE (m)
P0-P1	3.56	3.82	0.26
P0-P2	8.02	8.74	0.72
P4-P3	2.49	2.54	0.05
P4-P5	31.42	31.81	0.39
P7-P6	4.69	4.72	0.03
P7-P8	29.31	29.36	0.05
P10-P9	5.36	5.42	0.08
P10-P11	6.84	7	0.16
P12-P13	4.03	3.95	-0.08
P12-P14	8.74	8.7	-0.04

Tabella 27: Distanze 3D, 2D e residui.

Dalla tabella si denota che l'errore massimo si ha alla base e corrisponde alla porzione più sporgente della facciata (P0-P2). Man mano che invece si calcolano i punti in zone che non sporgono di qualche metro ma di qualche centimetro (P7-P8) l'errore diminuisce notevolmente fino ad arrivare ad avere un errore di 4 cm nella zona che corrisponde ad un piano (P7-P6). Infine è stato notato che nella parte in alto a destra della facciata non c'è stato un allargamento e allungamento ma un restringimento in entrambi gli assi (P12-P13, P12-P14).

La statistica ottenuta dal calcolo delle distanze è quella mostrata in Tabella 25.

VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO	MEDIA	SCARTO QUADRATICO MEDIO
0.03 m	0.72 m	0.18 m	0.22 m

Tabella 28: Stima dei valori massimi e minimi, della media e dello scarto quadratico medio.

In conclusione si è notato che nel complesso la facciata è stata allungata (di circa 10 cm) e allargata (di circa 50 cm). Infatti, in Tabella 23, si denota il fatto che misure orizzontali forniscono residui maggiori rispetto a quelle verticali. Infine, tenendo conto del fatto che il foto raddrizzamento potrebbe avere un errore insito in relazione alle

variazioni di profondità, come mostrato in Tabella 27, il residuo è maggiore nelle porzioni della facciata in cui la profondità è maggiore e viceversa.

Tutto ciò porta a dire che l'errore calcolato teoricamente, come mostrato in Tabella 21, non è del tutto in linea con il caso determinato per via sperimentale. Il caso A non è attendibile in quanto l'errore non aumenta all'aumentare della distanza di presa.

Il caso B invece è leggermente sovrastimato in quanto calcola un range di errore di circa 64 cm (mentre il range calcolato sperimentalmente è di circa 18 cm) ma è giusto in quanto prevede che l'errore aumenti nelle zone in cui la profondità è maggiore. In questo caso di studio si capisce che l'errore è in funzione della profondità della facciata in quanto esso passa da 40 cm (dove il valore di profondità è massimo) ad un minimo di 5 cm (dove il valore di profondità è minimo).

Dalla Tabella 16 si denota che i residui calcolati tramite RDF, nel momento del posizionamento dei punti di appoggio, sono dovuti ad un errore di georeferenziazione poiché non corrispondono ai residui determinati sperimentalmente andando a misurare le distanze direttamente sull'immagine raddrizzata.

9. STAMPA 3D

In questo capitolo viene mostrata la procedura che è stata adottata per poter passare dalla nuvola densa di punti tridimensionale ad un modellino stampato tramite la stampante 3D *ZPrinter 310* del laboratorio SiLab del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna.

Il principio di funzionamento della stampante utilizzata è il *Plaster-based 3D Printing* anche detto *PP*. È un metodo che consiste nell'utilizzare una testina che stampa, su un letto di polvere (per il 90% composta da gesso), un legante, procedendo strato dopo strato fino al completamento del modello. La stampante crea il modello uno strato alla volta, spargendo uno strato di polvere e stampando con il getto d'inchiostro un legante nella sezione trasversale. Il limite di questa tecnica è la scarsa resistenza meccanica e l'aspetto poroso delle superfici del modello creato ma questo aspetto può essere superato andando ad impregnare la superficie con delle resinate apposite che vanno a migliorare le caratteristiche del materiale.

Le procedure principali sono essenzialmente due:

- dalla nuvola di punti tridimensionale creare una *mesh* ovvero una superficie;
- dare uno spessore alla superficie per creare un volume.

La superficie di stampa per il modello è di circa 20 cm x 25 cm (corrispondente ad una scala di 1:180), per questo motivo, essendo stato ottenuto un modello tridimensionale accettabile grazie alla **Fotogrammetria** digitale, tramite il software *Agisoft Photoscan*, è stato deciso di operare con questo dato.

Tramite il software *Low Cost* è stata estrapolata la *mesh* grazie al comando *File* → *Export Model* ed è stato salvato in .OBJ (Figura 209 a) in quanto file leggibile da altri programmi quali *Rapidform XOR3 64*. Questo formato è un formato dati semplice contenente la descrizione di una geometria 3D, il quale include la posizione di ciascun

vertice di coordinate per la texture, le normali e le facce che costituiscono ciascun poligono definito come lista di vertici.

Grazie a questa superficie, utilizzando il software *Rapidform XOR3 64*, è stato creato un volume tramite il comando *Mesh* → *Thicken* il quale dà alla superficie uno spessore (Figura 209 b) richiesto dall'utente pari a 50 cm (in scala reale).

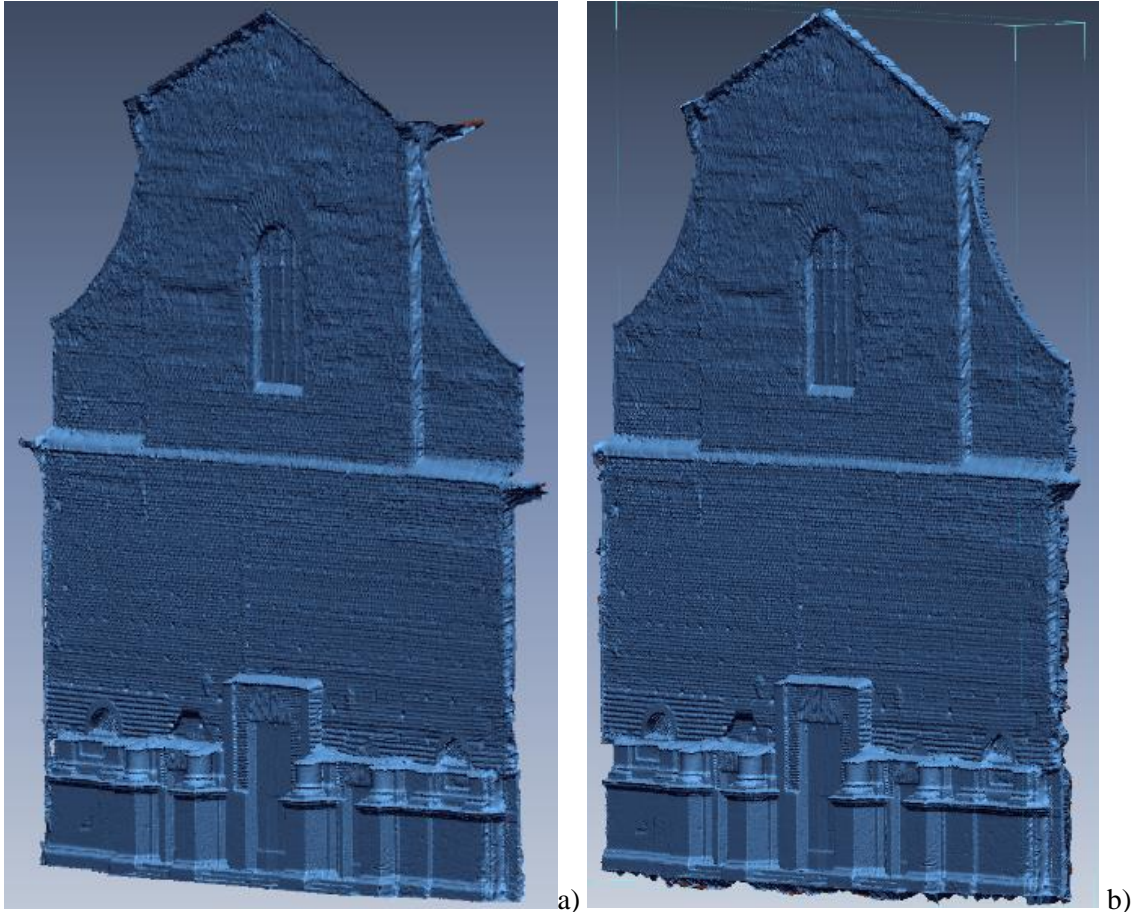


Figura 209: Superficie ottenuta con *Agisoft Photoscan* (a) e realizzazione di uno spessore andando così a creare un volume con *Rapidform XOR3 64* (b).

Una volta realizzando il volume, il file è stato salvato nel formato *.STL* in quanto formato standard leggibile dal programma *Zprint*, software dato di default dalla casa produttrice della stampante. Questo formato è il formato standard nel mondo della prototipazione e delle stampanti 3D e descrive solo la geometria della superficie di un oggetto tridimensionale, senza alcuna rappresentazione di colore, texture o altro modello. Esso deve essere esportato come file binario in modo da far risparmiare tempo e dimensione del file.

Tramite Zprint è possibile impostare la posizione di stampa del modello tridimensionale. Dalla Figura 210 si può vedere che il modello è stato posizionato di sbieco così da ottenere un prodotto di dimensioni superiori ed inoltre, avendo caricato due progetti dello stesso tipo, sono stati affiancati e alla stampante è stato dato il comando di stampare solo la parte che sta al di sopra della freccia gialla presente nel riquadro a sinistra. In questo modo sono state stampate separatamente due porzioni della facciata così da ottenere un oggetto leggermente più grande della superficie di stampa.

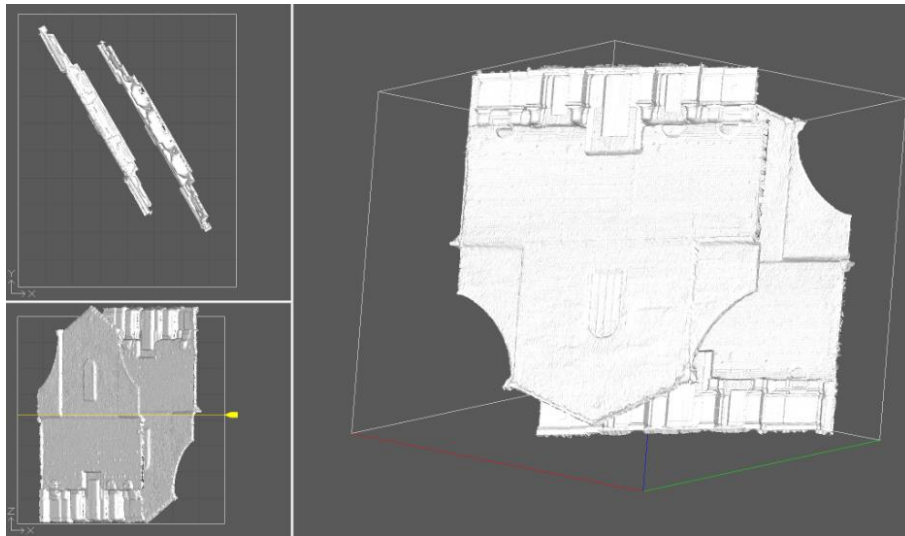


Figura 210: Impostazione delle posizioni per la stampa. Per ottenere un modello leggermente più grande sono stati importati due file dello stesso tipo e sono stati inseriti di sbieco. Inoltre in basso a sinistra si nota una freccia gialla che rappresenta la posizione nella quale il modello viene stampato. In questo modo il modello tridimensionale viene stampato in due parti.

Il processo di stampa è durato circa 8 ore e ,una volta finito tale processo, il modello è stato estratto dalla polvere che lo ricopriva con molta delicatezza, tramite un pennello, poiché il materiale è molto fragile (Figura 211). Successivamente è stata eliminata la poca polvere rimasta tramite una pistola ad aria compressa (Figura 212). Il risultato di questa prima fase di lavorazione è quello mostrato in Figura 213 e in Figura 214.



Figura 211: Estrazione del modello dalla stampante. Come si può notare esso è ricoperto dalla polvere di gesso.



Figura 212: Processo di pulizia del modello tramite una pistola ad aria compressa per poter rimuovere le piccole porzioni di polvere rimaste.

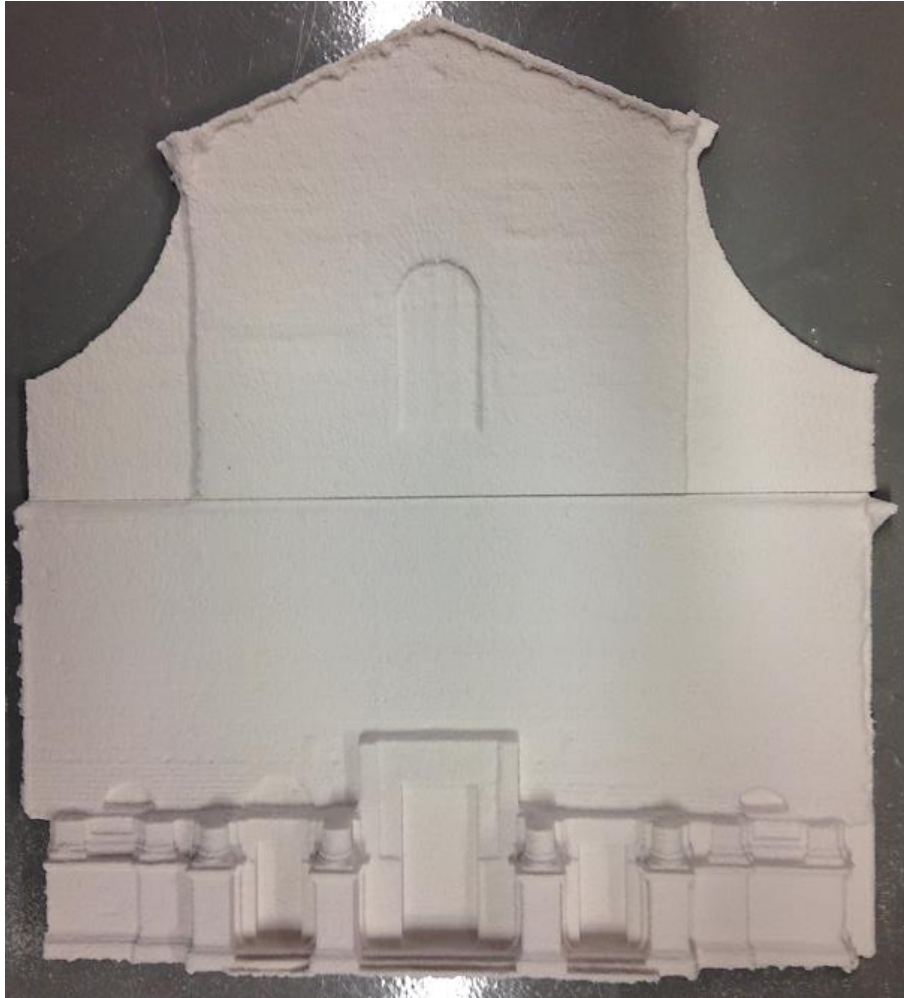


Figura 213: Modello ottenuto dopo la pulizia.



Figura 214: Particolare del portone principale alla base della facciata.

La seconda fase è rendere il materiale, di cui è costituito l'oggetto, meno fragile. Questo processo viene eseguito attraverso la resinatura con cianacrilato. In questo modo il modello è molto meno fragile e più resistente (Figura 215).



Figura 215: Risultato dopo la resinatura. Il materiale è stato reso più robusto rispetto a prima.

Infine il modellino è stato sottoposto ad un processo di sabbatura, per rendere il materiale meno lucido e più opaco, e, tramite l'incollaggio, sono state attaccate assieme le due porzioni (Figura 216). Il modello finale ha le dimensioni di 20 cm x 22 cm.

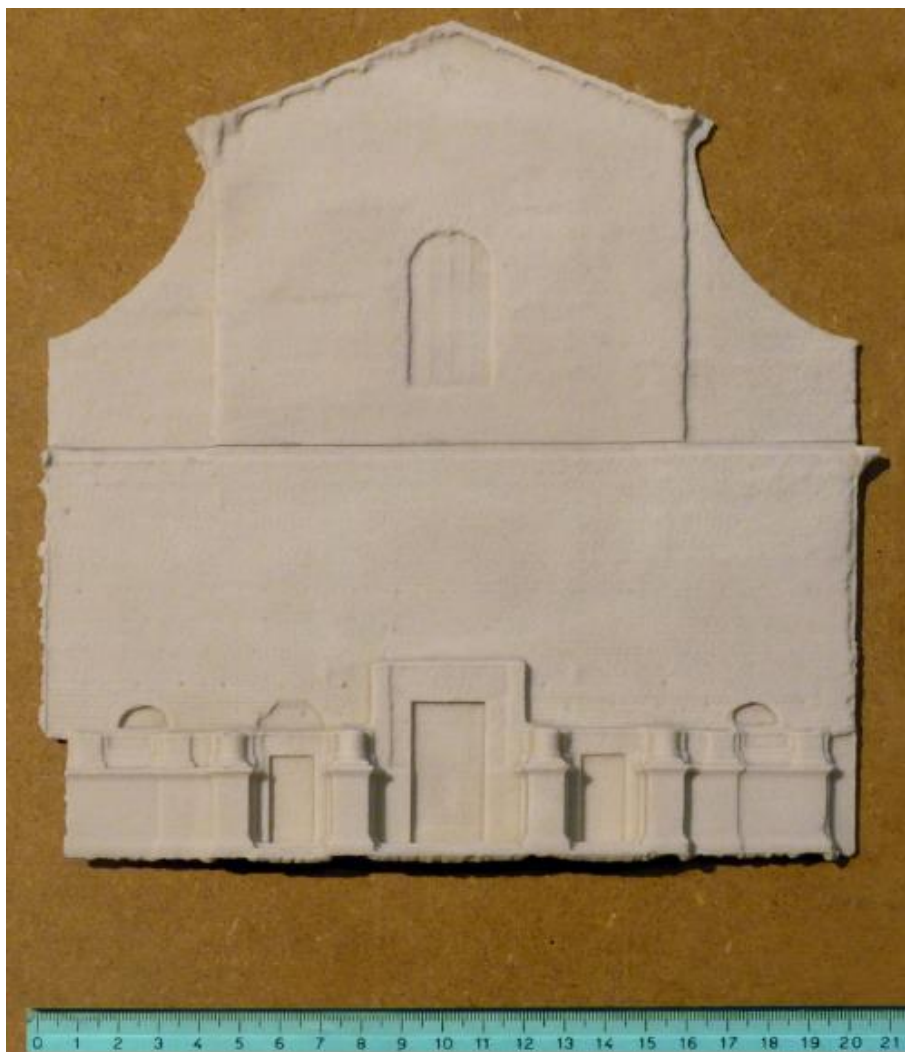


Figura 216: Prodotto finale ottenuto con una procedura di sabbiatura per rendere il materiale leggermente meno lucido e successivo incollaggio delle due parti. Questo modello mostra la chiesa nell'interezza senza rappresentare nel dettaglio le tipologie murarie che lo caratterizzano.

Per poter raffigurare un dettaglio della facciata della chiesa di Santa Lucia, è stata utilizzata invece la nuvola di punti tridimensionale ottenuta tramite il **Laser** in quanto considerata più accurata rispetto alla precedente. Questa era rappresentata da una mole di punti tale da non poter consentire al programma di funzionare bene.

Per questo motivo, tramite il software *Rapidform XOR3 64*, si è optato si filtrare questa nuvola tramite il comando *Point Cloud* → *Sampling* ed è stato selezionato il comando *Sampling Ratio 25%* in questo modo il software ha eliminato il 75% dei punti. Tramite questa procedura si è passati da una nuvola di punti costituita da 108926419 di punti ad

una nuvola di circa 26732853 di punti (l'interdistanza dei punti sull'oggetto è pari a 3 cm circa).

Avendo deciso di stampare un particolare alla base della facciata, è stata studiata solo la parte in basso. Tramite il programma *Geomagic Studio 2013*, prima di creare la mesh è stata eseguita una pulizia eliminando tutti i punti che non facevano parte del piano della facciata. Successivamente è stata creata una superficie di tale porzione tramite l'interpolazione di *Poisson*. Nel caso in cui si lavori con una nuvola di punti che rappresenta un oggetto o una scena tridimensionale, come nel caso di questo lavoro, risulta utile utilizzare questo tipo di algoritmo. Per poter utilizzare l'interpolazione di *Poisson*, è necessario che il data set messo in input abbia associato ad ogni punto della nuvola la sua normale rispetto alla superficie.

In questo modo è stata creata una mesh con la presenza di alcuni “buchi”, ovvero zone in cui l'interpolazione non era andata a buon fine, e per andare a colmare questo problema è stata selezionata la superficie e con il comando *Poligoni → Riempi* si è costruita una superficie chiusa.

Creata una superficie, il passo successivo è quello di creare un volume apportando uno spessore a questa facciata per tale motivo è stato proiettato un piano verticale sull'oggetto “appiattendolo” la facciata in modo da creare un piano ed infine è stato fatto un offset di un metro (Figura 217). Per poter unire la superficie della facciata con i piani appena creati, sono stati creati dei contorni che univano e quindi chiudevano i vari piani ed infine, sempre tramite il comando *Poligoni → Riempi* è stato unito il tutto (Figura 218).

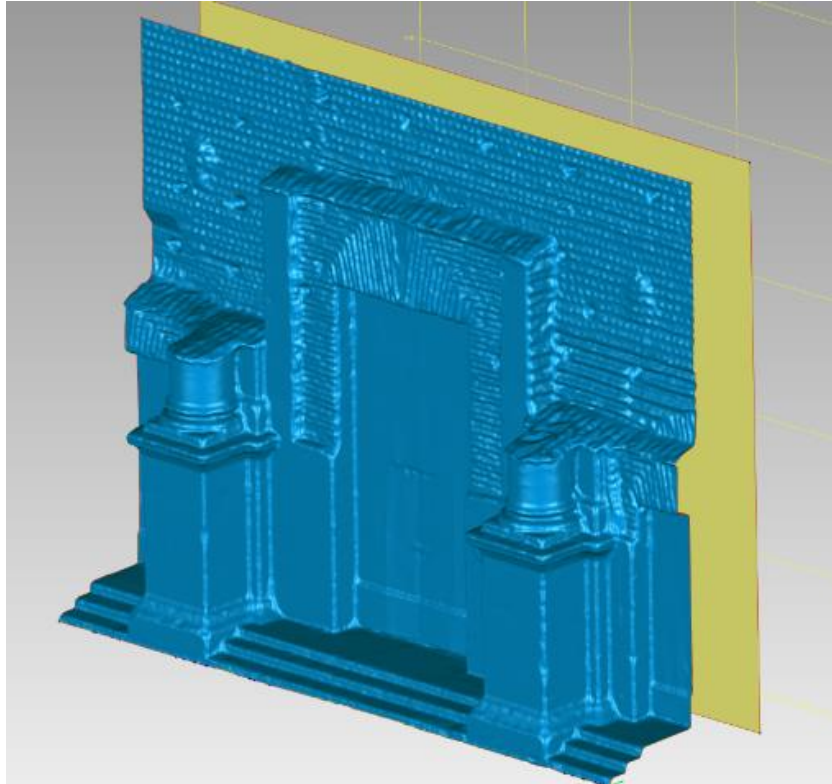


Figura 217: In azzurro viene rappresentata la superficie e in giallo il piano creato per poter creare un volume.



Figura 218: Volume finale ottenuto grazie all'unione delle due superfici.

Il file è stato salvato in .STL in quanto leggibile dal programma *Zprint*. Tramite questo software è possibile impostare la posizione di stampa del modello tridimensionale (Figura 219).

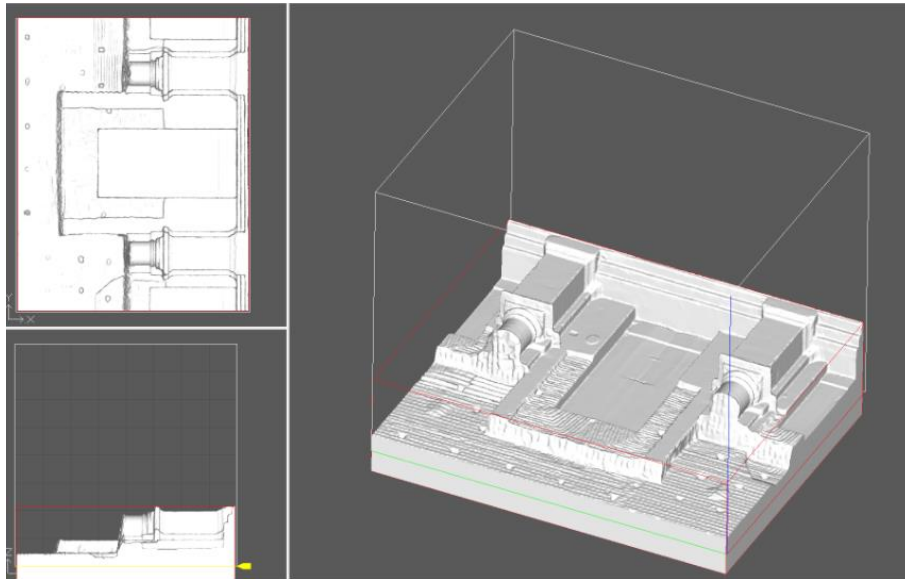


Figura 219: Impostazione delle posizioni per la stampa.

I procedimenti al termine della stampa sono gli stessi descritti per il modello precedente, a parte il collaggio che in questo caso non è stato necessario (Figura 220, Figura 221, Figura 222 e Figura 223). Il risultato finale del particolare del portone principale, di dimensioni 25 cm x 20 cm, è quello mostrato in Figura 224.



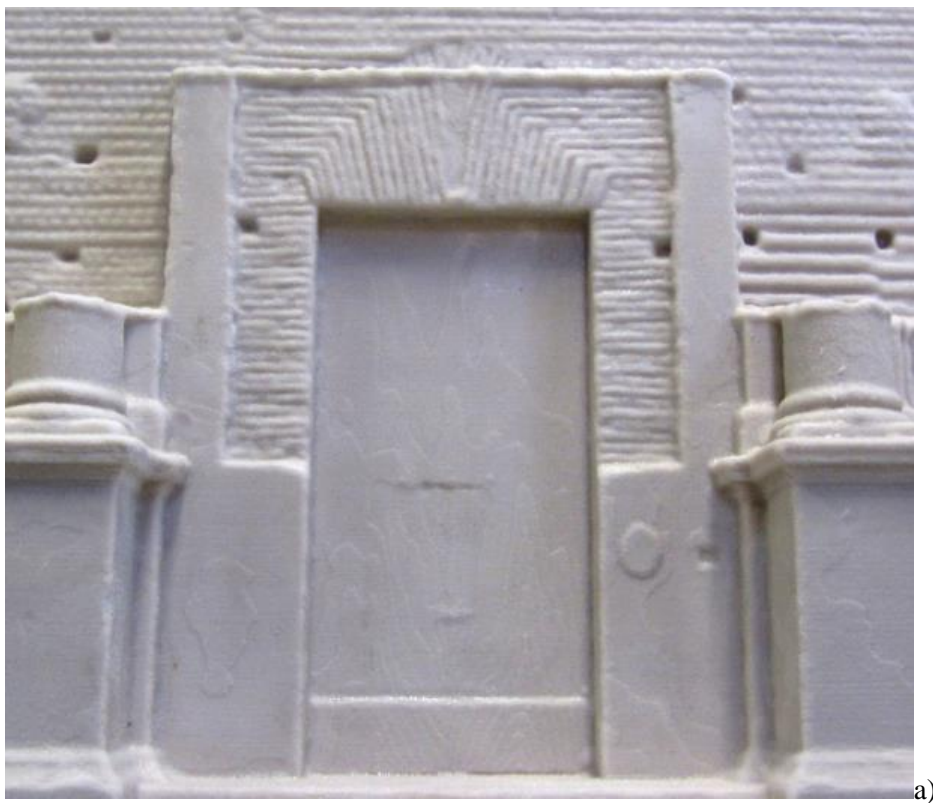
Figura 220: Prodotto appena stampato con ancora della polvere insediata.

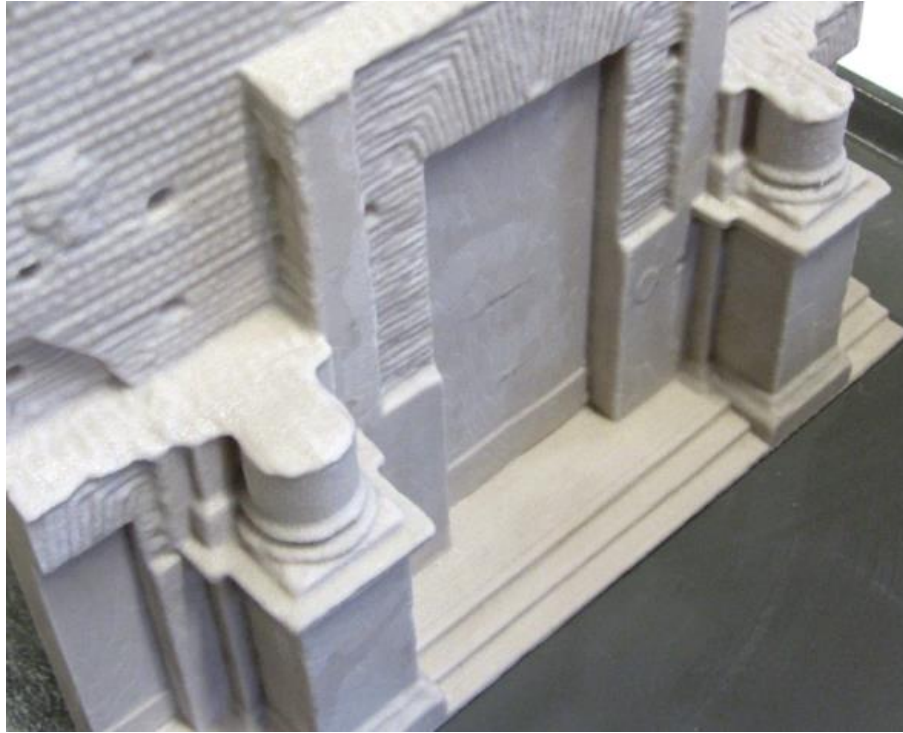


Figura 221: Prodotto ottenuto dopo la pulizia dalla polvere tramite la pistola ad aria compressa.



Figura 222: Prodotto ottenuto dopo la resinatura con cianacrilato per ottenere un modello costituito da un materiale meno fragile.





b)

Figura 223: Particolare del modello stampato, visto frontalmente (a) e visto dall'alto (b). Come si può notare tramite questa stampa dettagliata è possibile vedere la tessitura muraria e i fori presenti nella facciata.

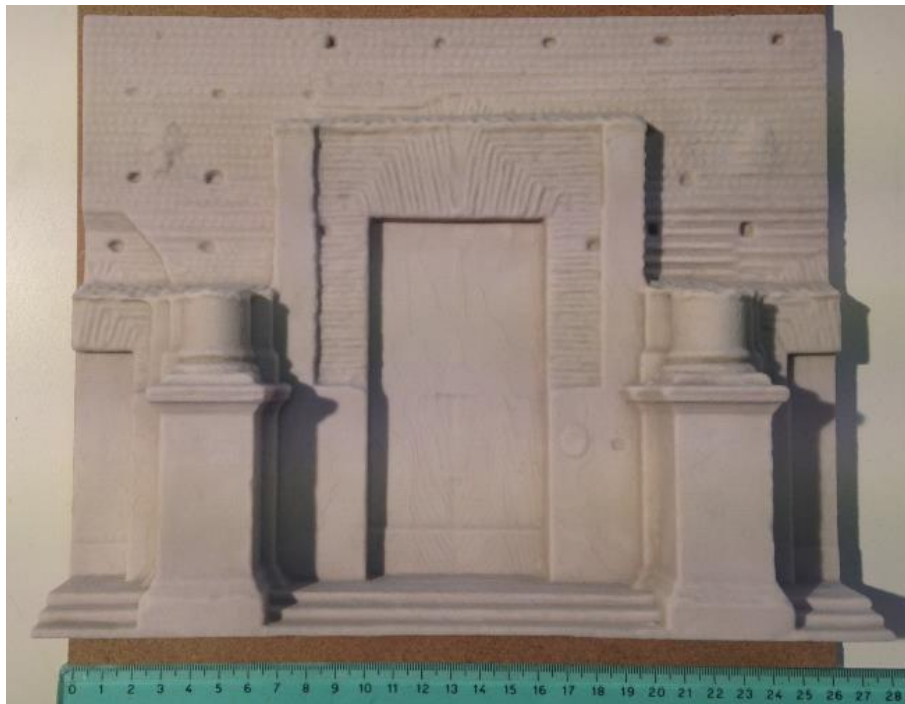


Figura 224: Prodotto finale ottenuto mediante la procedura di sabbiatura per rendere il materiale leggermente meno lucido.

In conclusione sono stati ottenuti due modelli, uno raffigurante la facciata della chiesa nel complesso e uno raffigurante il particolare del portone principale (Figura 225). Il modello della facciata è stato stampato in scala 1:150 mentre il particolare in scala 1:60.



Figura 225: Prodotti ottenuti tramite la stampa 3D, la facciata nel complesso a sinistra e il particolare del portone a destra.

CONCLUSIONI

Nel corso della presente tesi si sono sperimentate tecniche di rilievo differenti volte alla generazione di elaborati vettoriali e raster caratterizzati da differenti accuratezze e costi di realizzazione.

Oggetto del rilievo è stata la facciata della chiesa di Santa Lucia in Bologna la quale è attualmente sede dell'Aula Magna dell'Università degli Studi di Bologna.

Il primo rilievo realizzato è stato quello tramite laser scanner terrestre grazie al quale è stata ottenuta una nuvola di punti tridimensionale presa come dato di riferimento. Contemporaneamente è stato realizzato un rilievo fotogrammetrico speditivo, avvalendosi di una camera digitale amatoriale e realizzando una serie di fotogrammi da terra, acquisiti nel giro di pochi minuti. I dati provenienti da ambo i rilievi sono stati elaborati e hanno prodotto nuvole dense di punti oggetto che sono state analizzate e modellate impiegando software commerciali e scientifici.

Infine è stato realizzato un raddrizzamento semplice della facciata poi utilizzato in ambiente GIS per produrre una cartografia numerica.

Con questo tipo di rilievo è stato possibile valutare le performance di due software, uno open source e uno commerciale dotato di licenza, i quali implementano algoritmi di correlazione automatica simili; in particolare si sono confrontate le nuvole di punti ottenute con la fotogrammetria con un dato di riferimento e dotato di un'elevata accuratezza, cioè con la nuvola di punti ottenuta tramite la scansione laser, al fine di convalidare i prodotti ottenuti con la fotogrammetria.

Senza dubbio, dai risultati ottenuti, è possibile precisare che il software open source *Visual SfM* è inutilizzabile per questo tipo di rilievo in quanto esso si basa essenzialmente sul fatto che l'acquisizione delle immagini sia fatta *ad hoc*, cioè la geometria di presa, il fattore di scala, il ricoprimento e l'appoggio vengano progettati accuratamente in base ai risultati voluti. In questo rilievo speditivo le prese sono state fatte da terra e questo non ha permesso al programma di restituire le nuvole di punti

nella parte alta della facciata anche se i singoli fotogrammi sono stati corretti sulla base dei parametri di orientamento interno stimati tramite una calibrazione effettuata in laboratorio. Si può comunque affermare che questo software con una buona geometria e distanza di presa e con una ridondanza sufficiente è in grado di generare prodotti finali di adeguata qualità; infatti attraverso il confronto con il dato laser si è notato che il range di errore era inferiore a quello che ci si poteva aspettare dal calcolo teorico.

Per quanto riguarda invece il software commerciale *Agisoft Photoscan* è importante sottolineare che il risultato ottenuto è buono, in quanto sono stati restituiti molti più punti, andando ad ottenere anche la parte alta della facciata. Gli errori, riscontrati con il confronto ottenuto con il laser sono accettabili in quanto inferiori anch'essi rispetto a quelli attesi tramite il calcolo teorico.

Naturalmente sia con la fotogrammetria che con il laser sono stati riscontrati degli errori dovuti essenzialmente alla geometria di presa, quali le occlusioni prospettiche. Questo problema risale sempre al fatto che sia le scansioni che le fotografie sono state effettuate da terra quindi porzioni di facciata rientranti non sono state restituite.

Il Laser Scanning è dotato di un'ottima precisione ma, come mostrato in Figura 192, presenta degli artefatti, cioè errori, in quanto mostra un segmento che congiunge delle porzioni che nella realtà non è presente. Questo fatto va ad inficiare sulla bontà del risultato anche perché con la fotogrammetria questo tipo di errore non è presente.

Grazie al dato laser che si aveva come riferimento, è stato possibile determinare quale calcolo teorico approssimativo dell'errore può essere adeguato per questo caso di studio e casi simili. Grazie al confronto dei dati sperimentali si è riscontrato che il calcolo teorico che approssima al meglio la previsione dell'errore, nel caso tridimensionale, è il caso C (vedi in Tabella 18) per la parte alta della facciata mentre l'errore nella parte bassa è prossimo al valore del GSD.

Oltre ad uno studio delle nuvole tridimensionali, è stato eseguito un foto raddrizzamento della facciata della chiesa e, sempre confrontandolo con il dato laser, ne è stata valutata l'accuratezza sia del prodotto sia dell'errore teorico.

Dal prodotto bidimensionale si è riscontrato che con l'uso di una sola fotografia è possibile ottenere un'immagine con valenza metrica accurata. Il range di errore

calcolato è intorno ai 20 cm che rispetto ai 36 metri della facciata può essere considerato accettabile. Inoltre, come nel caso delle nuvole, è stato verificato che l'errore su un fotopiano dipende essenzialmente dalla variazione di profondità. Infatti porzioni che presentavano profondità più accentuate avevano residui maggiori rispetto a zone in cui non vi era alcuna profondità (Tabella 27). In questo caso la validazione dell'errore teorico non è chiara come nel caso delle nuvole di punti in quanto il caso A della Tabella 21 non è accettabile, perché l'errore non varia in base alla distanza di presa, e il concetto del caso B è giusto, poiché va ad evidenziare il fatto che l'errore dipende dalla variazione di profondità, cioè dove la profondità è maggiore anche l'errore aumenta, ma i valori ottenuti teoricamente vanno a sovrastimare (soprattutto nella zona con maggiore profondità) l'errore.

In conclusione per quanto riguarda la modellazione di nuvole di punti tridimensionali tramite la fotogrammetria è stato dimostrato che si possono ottenere ottimi risultati però tenendo conto di tre aspetti fondamentali durante la fase di acquisizione: geometria di presa, distanza di presa e ridondanza. Se per esempio lo scopo di questo studio fosse eseguire valutazioni rigorosamente metriche sui punti per uno studio di tipo strutturale, sarebbero necessari nuvole meno fitte ma caratterizzate un grado di accuratezza più elevato e affidabile.

Per quanto riguarda la generazione di prodotti raster a valenza metrica, sicuramente un'ortofoto generata in Agisoft Photoscan od un semplice raddrizzamento fotografico rappresentano degli elaborati virtuali interessanti per lo studio geometrico e per la comprensione dell'oggetto in ambito architettonico, come ad esempio la localizzazione delle fessure, oppure la pianificazione di un intervento di restauro.

Secondo questo studio la fotogrammetria risulta paragonabile al laser se vengono rispettate le tre regole fondamentali già dette (geometria di presa, distanza e ridondanza). Facendo un rilievo speditivo si ottengono dei risultati buoni, ma di scarsa accuratezza rispetto a quelli ottenuti con la scansione laser. In ogni caso bisogna comunque tener conto che un rilievo fotogrammetrico, rispetto a quello fatto utilizzando il laser, vince per praticità ed economicità e investendo del tempo sul posto si possono ottenere prodotti anche per un eventuale scopo ingegneristico.

BIBLIOGRAFIA

- Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.0.0, Agisoft LLC, 2013.
- Alshawabkeh Y., Douglas K., Matarya M., Khrisat B., “Combined photogrammetric techniques and computer vision: 2d–3d recording of Gharissa, Jordan”, *Journal of Architectural Conservation*, 2011.
- Angelini A., Gabrielli R., “Laser scanning e photo scanning. tecniche di rilevamento per la documentazione 3d di beni architettonici ed archeologici”, Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali CNR – Roma, p. 379-394, 2013.
- Barazzetti L., Binda L., Scaioni M., Taranto P., “Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the ‘G1’ temple in Myson, Vietnam”, *Journal of Cultural Heritage* 12, p. 253–262, 2011.
- Barnat C, “3D PRINTING: The Next Industrial Revolution”, *ExplainingTheFuture.com*, 2013.
- Bastonero P., Donadio E., Chiabrando F., Spanò A., “Fusion of 3D models derived from TLS and image-based techniques for CH enhanced documentation”, *ISPRS Technical Commission V Symposium*, 23 – 25 Riva del Garda, Italy, 2014.
- Bezzi A., Bezzi L., “L’utilizzo di tecniche Structure from Motion e Image-based Modelling in ambienti estremi”, Trento , 2012.
- Bitelli G., “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali”, 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 2014.
- Bitelli G., “I sistemi laser scanner terrestri”, Corso di rilevamento metrico del costruito, Università di Bologna, 2015.
- Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A., “Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies”, *Proceedings of the 20th ISPRS congress*, Istanbul, Turkey, Commission V, WG V/2, 2004.

- Bitelli G., Girelli V. A., Remondino F., Vittuari L., “The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation”, Proceedings of electronic imaging science and technology (SPIE), 2007.
- Bitelli G., Girelli V. A., Zanutta A., “Use of historical images for the documentation and the metrical study of cultural heritage by means of digital photogrammetric techniques”, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2006.
- Boehler W., Marbs A., “Comparing difference laser scanner”, Laser scanning terrestre, International centre for mechanical sciences collana di geodesia e cartografia, Udine, 2006.
- Bornaz L., “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione”, Laser scanning terrestre, International centre for mechanical sciences collana di geodesia e cartografia, Udine, 2006.
- Brown D. C., “Close-range camera calibration”, Photogrammetric Engineering, Vol. 37(8), p. 855-866, 1971.
- Ceppi G., “Granicolor”, Facoltà del design, Politecnico di Milano, 2012.
- Chiabrando F, Costamagna E, Spanò A., “La correlazione di immagini per la generazione di modelli 3D per il patrimonio costruito”, 2013.
- CloudCompare Version 2.6.1 User Manual.
- Fischler M. A., Bolles, R. C. “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, Communications of the ACM, 24(6), p. 381-395, 1981.
- Fini M., “Bologna sacra, Tutte le chiese in due millenni di storia”, Edizioni Pendragon, 2007.
- Georgopoulos A., Tsakiri M., Ioannidis C., Kakli A., “Large scale orthophotography using DTM from terrestrial laser scanning”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35 (B5), p. 467–472, 2004.
- Girelli V. A., Tini M.A., Zanutta A., “Traditional and unconventional photogrammetric techniques for metrical documentation of cultural heritage: the example of the

“Rolandino dei passeggeri” tomb (St. Domenico Square) survey in Bologna”, CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy, 2005.

Guerra F., “Studi sulle caratteristiche metriche e operative dei sistemi di scansione 3D e dei sistemi fotogrammetrici”, Progetto Iuav_lab Laboratori di innovazione per l’architettura, Venezia, 2012.

Guerra F., Pilot L., Vernier P., “Fotogrammetria e laser scanning: alternativa?”, iuav.it, 2013.

Guidi G., Russo M., Beraldin J. A., “Acquisizione 3D e modellazione poligonale”, McGraw-Hill Companies, 2010.

Hanan H., Suwardhi D., Nurhasanah T., Santa Bukit E., “Batak toba cultural heritage and close-range photogrammetry”, Procedia - Social and Behavioral Sciences p. 187-195, 2015.

Karaska L., Yakar M., Korumaz A. G., Karasaka E., “3D modelling and detail of Inceminare Medresseh by digital photogrammetry and laser scanning method”, 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan, 2009.

Kersten T. P., “Combination and comparison of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for the generation of virtual models in cultural heritage applications”, The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST, p. 207–214, 2006.

Kersten T. P., Lindstaedt M., “Image-based low-cost systems for automatic 3d recording and modelling of archaeological finds and objects”, Process in Cultural Heritage Preservation, 4th International Conference, Springer, EuroMed 2012.

Kioussi A., Karoglou M., Bakolas A., Moropoulou A., “Integrated documentation protocols enabling decision making in cultural heritage protection”, Process in Cultural Heritage Preservation, 4th International Conference, Springer, EuroMed 2012.

Kraus K., “Fotogrammetria”, libreria universitaria Levrotto & Bella, 1994.

- Kruth J. P., Levy G., Schindel R., Craeghs T., & Yasa E., "Consolidation of polymer powders by selective laser sintering", in Proceedings of the 3rd International Conference on Polymers and Moulds Innovations, p. 15-30, 2008.
- Lague D., Brodu N., Leroux J., "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013.
- Lingua A., Marenchino D., Nex F., "L'operatore Sift per l'orientamento di immagini acquisite con prese non-normali", Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 2008.
- Lowe D. G., "Object recognition from local scale-invariant features", Paper presented at the Computer vision, the proceedings of the seventh IEEE international conference on, 1999.
- Lowe D. G., "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". International Journal of Computer Vision, 60(2), p. 91-110, 2004.
- Maietta A., "Stampa 3D: guida completa", collana Made for Markers, LSWR Srl, 2014.
- Mancera-Taboada J., Rodríguez-González P., González-Aguilera D., Muñoz-Nieto A., Gómez-Lahoz J., Herrero-Pascual J., Picón-Cabrera I., "On the use of laser scanner and photogrammetry for the global digitization of the medieval walls of Avila", IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3°, Saint-Mandé, France, 2010.
- Mavromati D., Petsa E., Karras G. E., "Experiences in photogrammetric archaeological recording", XIX CIPA International Symposium, Antalya, Turkey, p. 666-669, 2003.
- Moussa W., Abdel-Wahab M., Fritsch D., "An automatic procedure for combining digital images and laser scanner data", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012.
- Moussa W., Abdel-Wahab M., Fritsch D., "Automatic fusion of digital images and laser scanner data for heritage preservation", Process in Cultural Heritage Preservation, 4th International Conference, Springer, EuroMed 2012.

- Peloso D., “Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali”, Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali CNR, p. 199-224, Roma, 2005.
- Remondino F., “Heritage recording and 3d modeling with photogrammetry and 3d scanning”, Remote Sensing, p. 1104-1138, 2011.
- Remondino F., Del Pizzo S., Kersten T. P., Troisi S., “Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – a critical overview”, Process in Cultural Heritage Preservation, 4th International Conference, Springer, EuroMed 2012.
- Remondino F., Spera M.G., Nocerino E, Menna F, Nex F., “State of the art in high density image matching”, The Photogrammetric Record 29(146): p. 144–166, 2014.
- Rinaudo F., “Il laser scanning terrestre per il rilievo e l’analisi di Beni Architettonici e Archeologici”, Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA, Reggio di Colorno, 2011.
- Rinaudo F., “la tecnica del laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche”, la tecnica laser scanning: teoria e applicazioni, International centre for mechanical sciences collana di geodesia e cartografia, Udine, 2003.
- Rocchi G., “Architetture della Compagnia Ignazia nei centri antichi italiani”, Editrice Alinea, 1999.
- Roncella R., “Sviluppo e applicazioni di tecniche di automazione in fotogrammetria dei vicini”, Ricerche di Geomatica, Mestre, p. 119-128, 2007.
- Russo M., Remondino F., Guidi G., “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico”, Archeologia e Calcolatori, p. 169-198, 2011.
- Seitz S. M., Szeliski R. e Snavely N., “Photo tourism: exploring photo collections in 3D. Paper presented at the ACM transactions on graphics” (TOG), 2006.
- Sgrenzaroli M., Vassena G.P.M., “Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner”, Starrylink Editore, Brescia, 2007.
- Torres J.C., Arroyo G., Romo C., De Haro J., “3D digitization using Structure from Motion”, CEIG Spanish Computer Graphics Conference, 2012.

- Ullman S., “The interpretation of structure from motion”, Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 203(1153), 405-426, 1979.
- Verdiani G., Braghiroli A., “The ancient fragment collection at the museo archeologico in Florence, Italy, a digital proposal to allow its access”, Process in Cultural Heritage Preservation, 4th International Conference, Springer, EuroMed 2012.
- Voltolini F., Remondino F., Pontin M., Girardi S., Rizzi S., Gonzo L., “Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di beni culturali”.
- Wu C., “Critical configurations for radial distortion self-calibration”.
- Wu C., “VisualSFM: a visual structure from motion system”, 2011.
- Zanutta A., “Appunti di fotogrammetria”, corso di “Fotogrammetria applicata M”, Ingegneria Civile, Università di Bologna, 2015.
- Zanutta A., “Fotogrammetria analitica e digitale, differenze operative”, corso di “Fotogrammetria applicata M”, Ingegneria Civile, Università di Bologna, 2015.
- Zanutta A., “Introduzione alla fotogrammetria digitale”, corso di “Fotogrammetria applicata M”, Ingegneria Civile, Università di Bologna, 2015.

SITI WEB CONSULTATI

- Agisoft website: <http://www.agisoft.com/> (dicembre 2015).
- Appunti digitali website: <http://www.appuntidigitali.it/7427/tipologie-di-sensori-digitali-introduzione-a-ccd-e-cmos/> (dicembre 2015).
- Archivio storico website: <http://www.archivistorico.unibo.it/it/struttura-organizzativa/sezione-archivio-fotografico/archivi-fotografici-delluniversita-edilizia-universitaria-sezione-moderna/santa-lucia/?IDFolder=996&LN=IT#> (dicembre 2015).
- Canon website: http://www.canon.it/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_6d/ (dicembre 2015).

Close up engineering website: <http://closeupengineering.it/la-storia-della-stampa-3d/>
(dicembre 2015).

Google Maps website: <http://www.googlemaps.it> (dicembre 2015).

Il fatto quotidiano website: <http://www.ilfattoquotidiano.it/2014/07/20/chuck-hull-cosi-ho-inventato-la-stampante-3d/1066513/> (dicembre 2015).

MakerBot website: <https://www.makerbot.com/> (gennaio 2015).

Phototour website: <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/> (febbraio 2016).

Provincia di Bologna website: <http://www.provincia.bologna.it/emasdichiarazione2010/Engine/RAServePG.php/P/25231E100203> (dicembre 2015).

QGIS website: <http://www.qgis.org/it/site/> (gennaio 2016).

Rapidform website: <http://www.rapidform.com./home/> (dicembre 2015).

RDF website: www.iuav.it (gennaio 2016).

Ridible website: <https://www.ridible.com/stampa-3d/> (gennaio 2016).

Riegl website: <http://www.riegl.com/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/5/> (dicembre 2015).

Shapeways website: <http://www.shapeways.com/> (gennaio 2016).

Stampa 3D forum website: <http://www.stampa3d-forum.it> (gennaio 2016).

VisualSfM website: <http://ccwu.me/vsfm> (dicembre 2015).

WASP website: <http://www.wasproject.it/w/> (gennaio 2016).

Zcorp website: <http://www.zcorp.com/it/home.aspx> (gennaio 2016).

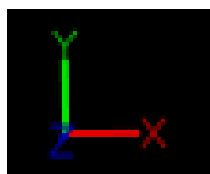
APPENDICE A

Monografie dei punti fotogrammetrici d'appoggio della chiesa di Santa Lucia

Posizione approssimata dei PFA



Orientamento del sistema di coordinate (X positivo verso destra, Y positivo verso l'alto e Z positivo uscente):



PUNTO 1



Spigolo sinistro del capitello della colonna nella parte sinistra della facciata. La colonna è la prima a partire dalla parte sinistra del prospetto della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-16.171	-9.269	0.827

PUNTO 2



Spigolo sinistro esterno del cornicione della finestra a mezza luna nella parte sinistra della facciata.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-14.163	-7.301	0.025

PUNTO 3



Spigolo sinistro del capitello della colonna nella parte sinistra della facciata, tra la finestra a mezzaluna e la porticina secondaria.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-10.134	-9.272	1.781

PUNTO 4



Spigolo esterno destro in alto della porta secondaria nella parte sinistra della facciata.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-5.800	-8.425	0.451

PUNTO 5



Spigolo destro del mattoncino del penultimo filare, in alto e a sinistra della porta principale sotto ai coppi.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-2.643	-4.822	0.451

PUNTO 6



Spigolo destro, all'altezza dell'ultimo filare di mattoni, in alto a destra della porta principale sotto ai coppi.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
2.168	-4.629	0.462

PUNTO 7



Spigolo esterno in alto a sinistra della porta secondaria nella parte destra della facciata.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
5.241	-8.431	0.411

PUNTO 8



Spigolo destro del capitello della colonna nella parte destra della facciata, tra la finestra a mezzaluna e la porticina secondaria.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
9.573	-9.241	1.763

PUNTO 9



Spigolo destro esterno del cornicione della finestra a mezza luna nella parte destra della facciata.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
13.561	-7.291	0.0002

PUNTO 10



Spigolo destro del capitello dell'ultima colonna presente nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
15.569	-9.277	0.788

PUNTO 11

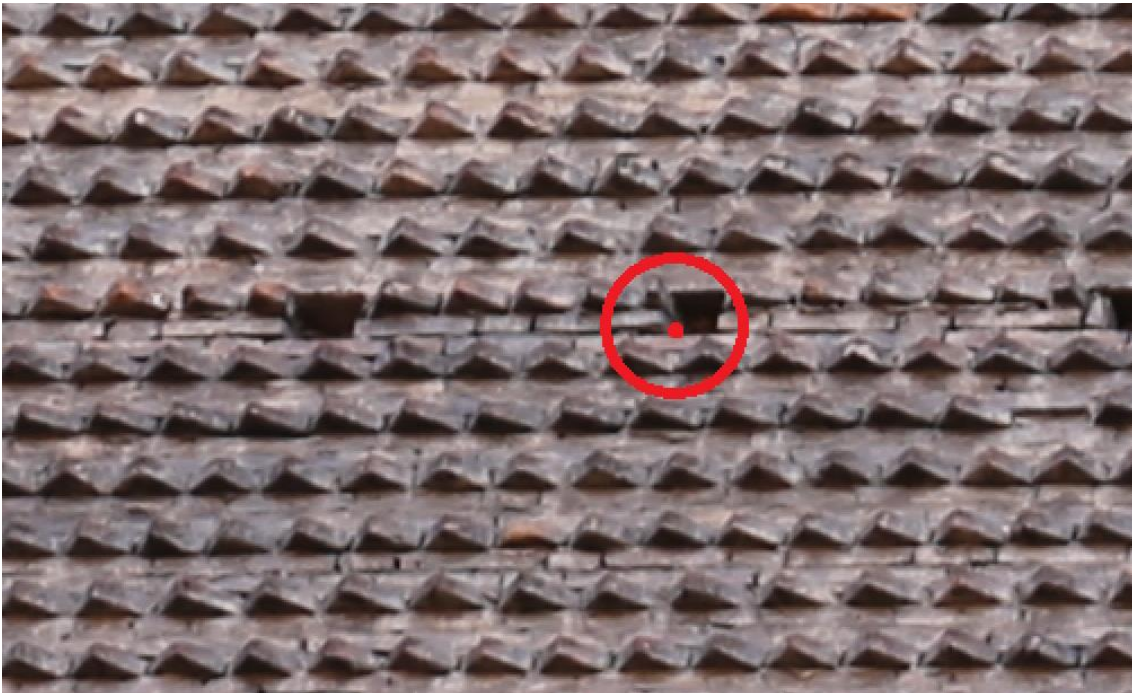


Spigolo destro esterno (in alto) del primo buco, a partire dall'alto, nella parte sinistra della facciata.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-16.121	2.324	-0.057

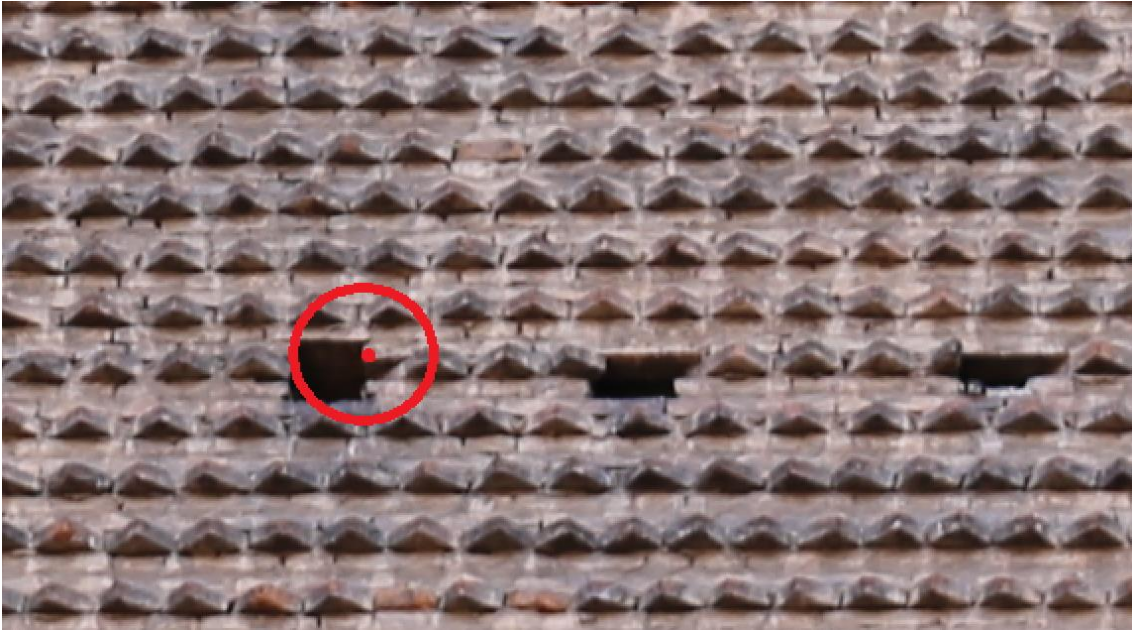
PUNTO 12



Spigolo sinistro esterno (in basso) del buco della seconda fila a partire dall'alto e il sesto a partire da sinistra.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-11.889	-1.219	-0.062

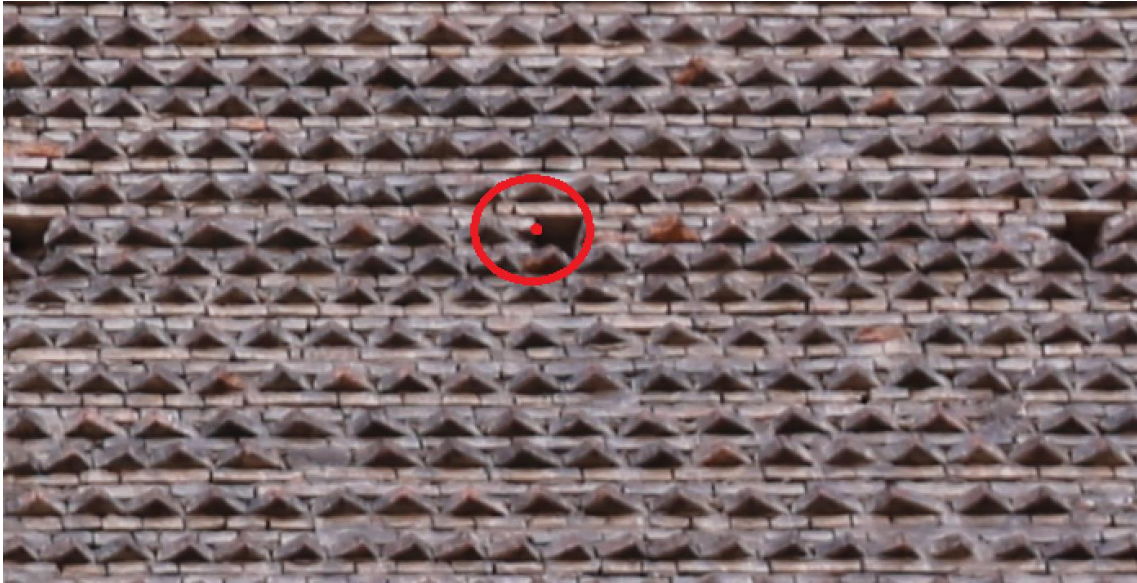
PUNTO 13



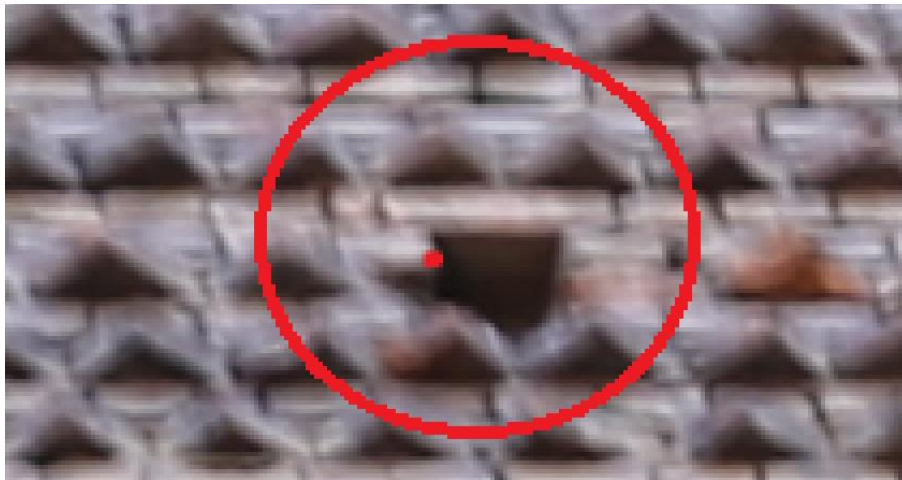
Spigolo destro esterno (in alto) del buco della terza fila a partire dall'alto e il decimo a partire da sinistra.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-7.809	-2.429	-0.059

PUNTO 14

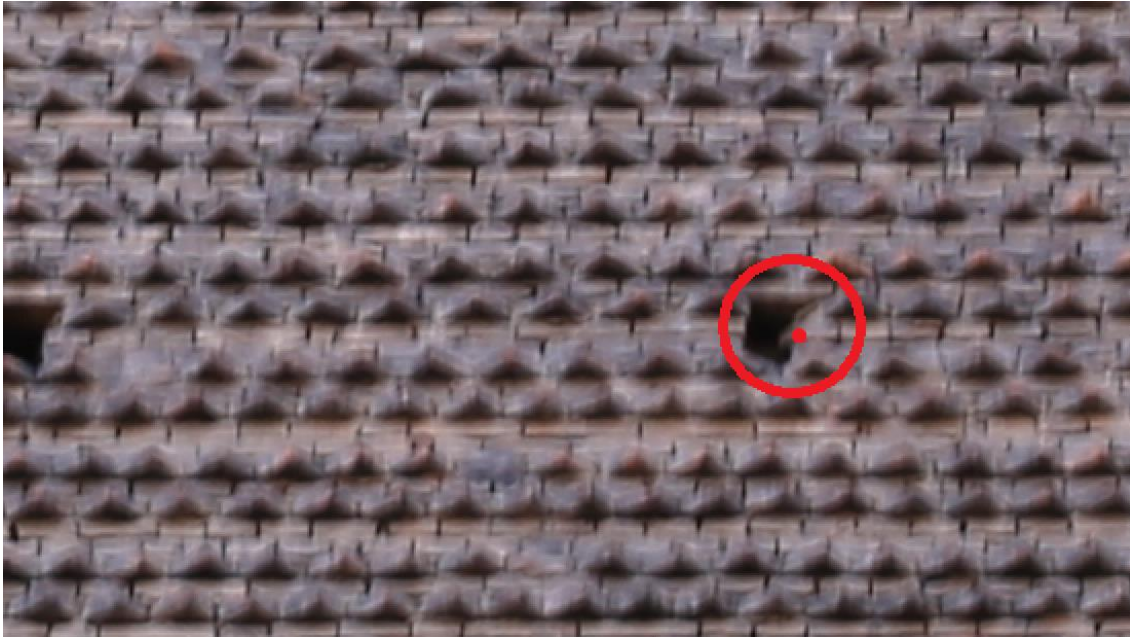


Spigolo sinistro esterno (in alto) del buco della prima fila a partire dall'alto nella parte centrale della facciata, sopra il portone principale.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-0.596	0.358	-0.047

PUNTO 15



Spigolo destro esterno (in basso) del buco della seconda fila a partire dall'alto e il quinto a partire da destra.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
7.345	-1.459	-0.071

PUNTO 16

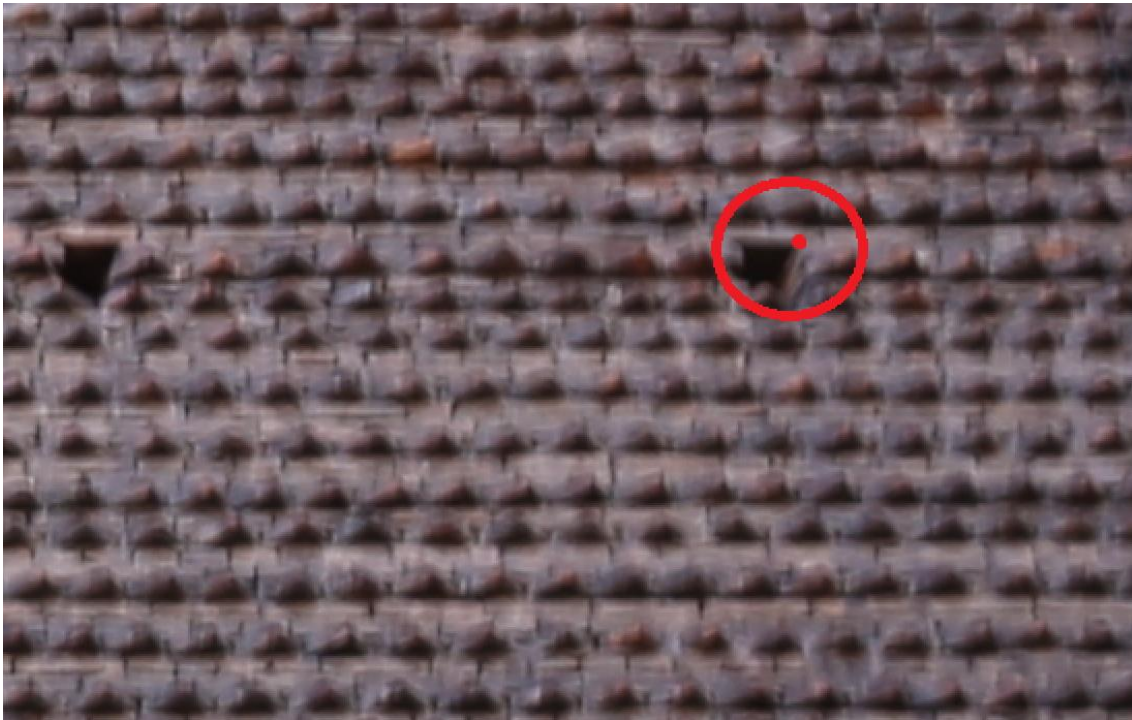


Spigolo sinistro esterno (in alto) del buco della terza fila a partire dall'alto e il terzo a partire da destra.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
11.145	-2.939	-0.055

PUNTO 17



Spigolo destro esterno (in alto) del buco della prima fila a partire dall'alto e il primo a partire da destra.



COORDINATE (m)		
X	Y	Z
14.903	0.337	-0.059

PUNTO 18



Spigolo della gronda nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-17.363	9.769	-0.660

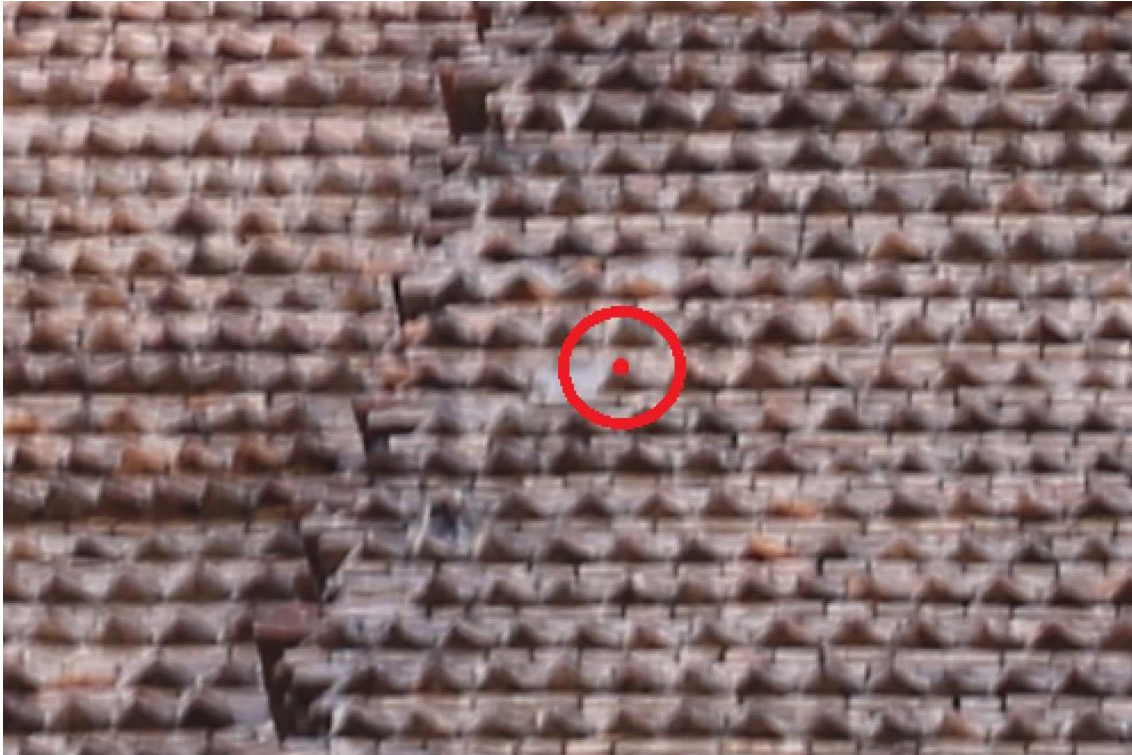
PUNTO 19



Spigolo centrale del mattone a dente di sega destro nella parte sinistra della facciata, a destra rispetto al deterioramento.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-14.521	5.995	-0.581

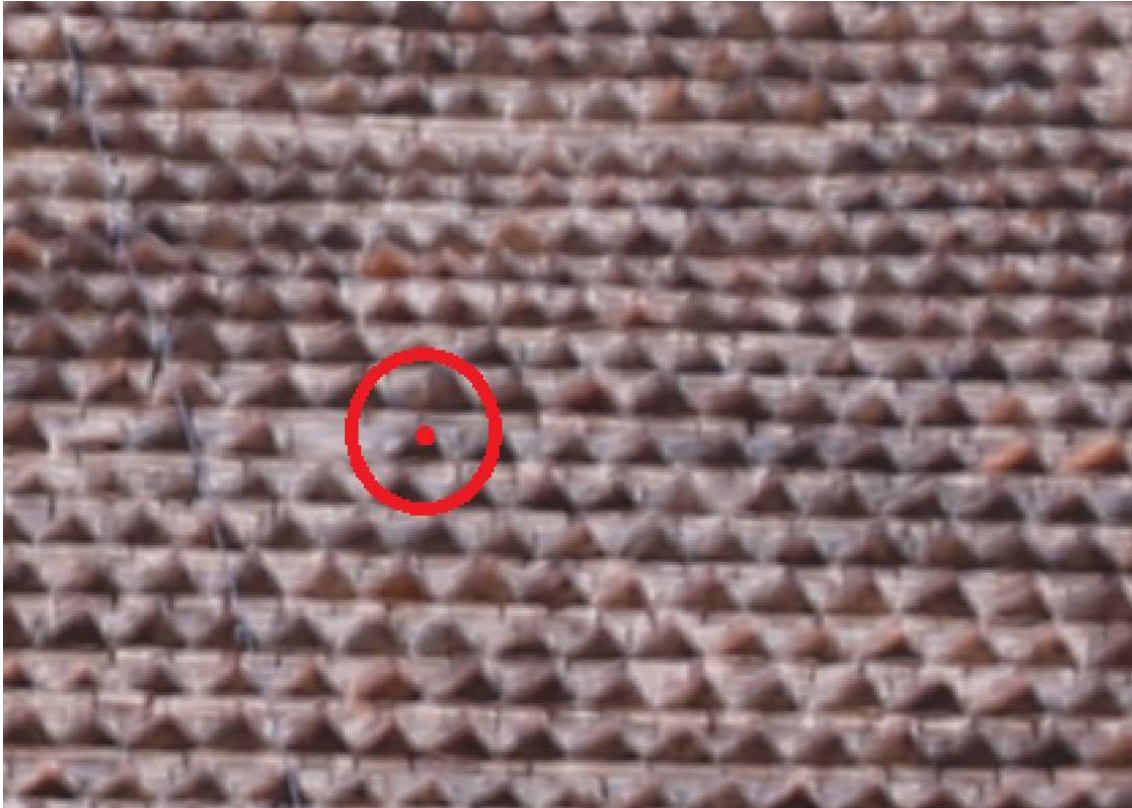
PUNTO 20



Spigolo centrale del mattone a dente si sega destro nella parte sinistra della facciata e a destra del deterioramento.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-9.379	6.625	-0.160

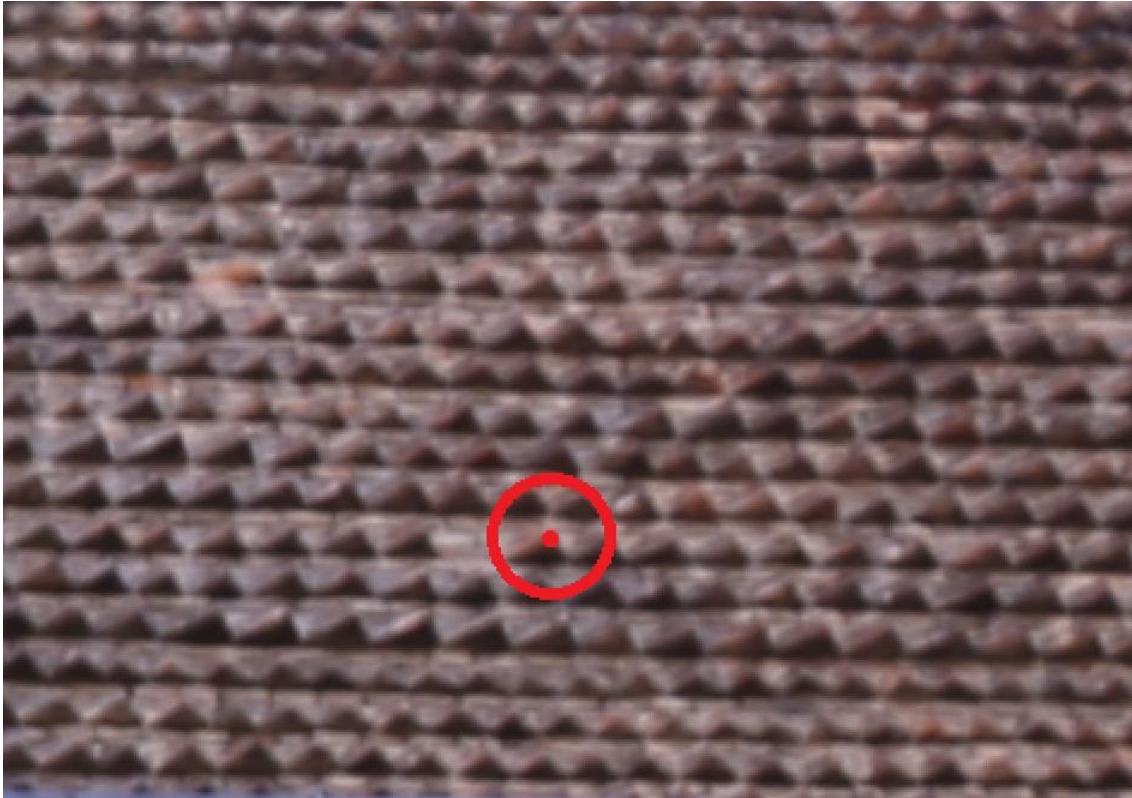
PUNTO 21



Spigolo centrale del mattone a dente di sega nella parte destra della facciata, a destra rispetto al deterioramento.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
5.704	7.995	-0.179

PUNTO 22



Spigolo centrale del mattone a dente di sega nella parte destra della facciata e a destra rispetto il deterioramento.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
11.735	6.429	-0.622

PUNTO 23



Spigolo della gronda nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
16.785	9.56	-0.605

PUNTO 24



Spigolo centrale del mattone a dente di sega nella parte sinistra della facciata. Il mattone è posizionato fra due deterioramenti.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-11.101	12.426	-0.522

PUNTO 25



Spigolo sinistro (in basso) nel telaio centrale della finestra nella parte alta e centrale della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-0.341	11.456	-0.345

PUNTO 26



Spigolo centrale del mattone a dente di sega nella parte destra della facciata, a destra rispetto al deterioramento.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
11.637	10.209	-0.621

PUNTO 27



Spigolo destro del buco in alto a sinistra della finestra centrale.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-3.064	15.272	-0.253

PUNTO 28



Spigolo sinistro del buco in alto a destra della finestra centrale.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
2.104	15.234	-0.293

PUNTO 29



Spigolo esterno destro del primo listello del tetto a partire da sinistra nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-9.141	19.242	-0.009

PUNTO 30



Spigolo esterno sinistro del secondo listello del tetto a partire da sinistra nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-7.568	19.882	-0.029

PUNTO 31



Spigolo esterno sinistro del terzo listello del tetto a partire da sinistra nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-5.804	20.662	-0.041

PUNTO 32



Spigolo esterno sinistro del quarto listello del tetto a partire da sinistra nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-4.041	21.445	-0.05

PUNTO 33



Spigolo esterno sinistro del quinto listello del tetto a partire da sinistra nella parte sinistra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-2.170	22.265	-0.063

PUNTO 34



Spigolo interno sinistro del listello del colmo sinistro del tetto.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
-0.423	22.996	-0.314

PUNTO 35



Spigolo esterno destro del quinto listello del tetto a partire da destra nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
1.621	22.300	-0.096

PUNTO 36



Spigolo esterno destro del quarto listello del tetto a partire da destra nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
3.412	21.534	-0.087

PUNTO 37



Spigolo esterno destro del terzo listello del tetto a partire da destra nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
5.258	20.743	-0.077

PUNTO 38



Spigolo esterno destro del secondo listello del tetto a partire da destra nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
7.101	19.911	-0.064

PUNTO 39



Spigolo esterno sinistro del primo listello del tetto a partire da destra nella parte destra della facciata.

COORDINATE (m)		
X	Y	Z
8.751	19.189	-0.086

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor *Antonio Zanutta* il quale ha dimostrato molta disponibilità nei miei confronti, è riuscito a trasmettermi una grande passione per questa materia e ha riposto molta fiducia nelle mie capacità.

Ringrazio tantissimo la mia correlatrice l'ing. *Valentina Alena Girelli*, detta "Vale", in quanto mi ha fornito il materiale indispensabile per lo svolgimento della parte sperimentale della tesi, e mi ha aiutata e sopportata nei momenti di crisi in questi mesi di permanenza nel laboratorio.

Inoltre, un dovuto e sentito ringraziamento va al laboratorio SiLab del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna. In particolare ringrazio *Giovanni Bacci* e *Simone Garagnani* per il supporto e l'aiuto che sono riusciti a fornirmi per l'elaborazione dei dati per poter produrre un modello stampabile.

Infine ringrazio profondamente tutto il personale del laboratorio LARIG, nel quale, soprattutto nella prima parte di elaborazione dati, ho vissuto più che a casa mia. Ringrazio nello specifico *Chiara, Pino, Ale* e *Vale* i quali mi hanno fatto sentire parte integrante dell'ambiente.

Grazie ai magnifici ragazzi e ragazze conosciuti all'interno del laboratorio con i quali ho condiviso molti stati d'animo. Un grazie particolare va ad *Ilaria* nominata ormai da tutti la "vecchia" la quale ogni giorno riusciva a trasmettere perle di saggezza, derivanti dalla sua età, e riusciva a farmi sorridere anche quando l'ansia soccombeva. Grazie per tutte le ore passate assieme tra treni e autobus, nei quali andavi in giro come una mongola pur di non toccare niente con le tue mani perché consideravi tutto sporco. Grazie per avermi mostrato la tua "agilità" nella corsa. Sono stati mesi bellissimi e sono contenta perché ho conosciuto una persona fantastica che riesce a farmi ridere a crepa pelle per qualsiasi cavolata che è in grado di inventare sul momento. Mi raccomando quando diventerai un'attrice famosa ricordati di me e ricordati che è solo una questione di "attimo"!!!! Un ringraziamento va anche agli altri ragazzi conosciuti quali *Alice*,

Silvia, Floris e per ultimo *Damiano*, con il quale mi scuso, anche da parte di *Ilaria* e di *Alice*, per aver dato il peggio di noi soprattutto a mensa con discorsi che è meglio non ricordare e che ringrazio per avermi tolto un sorriso, anche in momenti abbastanza critici.

È ora di ringraziare le persone che per me ci sono sempre state e che mi hanno sempre incoraggiata a fare meglio cioè il mio *babbo* e la mia *mamma*. Grazie *babbo* per aver sempre creduto nelle mie capacità quando ero io la prima a dire “non ce la farò”. Grazie per tutte le volte che mi ha istigato, anche con la forza, allo studio..solo così ho imparato a studiare. E grazie per non aver elogiato i miei risultati, in quanto anche se ti portavo a casa un 30 il tuo commento è sempre stato “bene”, perché dicevi che questo era il mio lavoro e stavo facendo solo il mio compito così mi hai dato la spinta di fare sempre meglio e di non dormire sugli allori. Grazie *mamma* per le infinite chiacchierate di sera con davanti una bella sigaretta, grazie per avermi sopportata in tutti i miei infiniti stati d’animo, dal giorno dell’euforia al giorno dell’incazzatura, dal giorno dell’umore a pezzi al giorno della gioia pura. Grazie perché in tutti quei momenti c’eri tu e hai saputo sempre dirmi cosa era meglio per me. Grazie per avermi capita e ascoltata e grazie per tutte le feste che facevi quando portavo un bel voto a casa. Infatti tu e *babbo* per questo fatto vi siete sempre compensati.

E come non ringraziare il mio magnifico fratellino, *Luca*, chiamato “Zanichelli 2000” che sa sempre farmi ridere con il suo linguaggio inventato, anche se ultimamente sta migliorando, che mi tiene sempre nascoste le sue storielle d’amore, ma che io in qualche modo scopro! Tra poco avrai finalmente 18 anni..mi raccomando cerca di avere pietà per la mia macchinina. Grazie per non lasciarmi mai sola, sono sicura che su di te potrò sempre contare anche perché assieme siamo “un’associazione a delinquere”.

Per concludere le persone della mia famiglia che mi hanno sempre sostenuta sono i miei nonni: nonna *Anna* e nonno *Gian*. Si sono i miei nonni ma è come se fossero i miei genitori perché con loro ho sempre passato un sacco di tempo. Grazie perché mi fate sentire un genio solo perché mi sono iscritta alla facoltà di ingegneria, grazie per avermi supportata in questi anni in cui l’ignoranza governava, grazie per avermi raccontato quelle mille volte la storia della nostra famiglia, prima o poi dovremo scriverne un libro, secondo me faremo concorrenza a Beautiful!! Grazie nonno per avermi dato il potere di

“toglierti le mutande prima dei pantaloni”, per essere stato sempre discreto nel criticare le mie scelte anche se sapevo che da te non erano ben accette, grazie per pavoneggiarti tutte le volte che parli di me, grazie per essere con me in un giorno così speciale.

Naturalmente un grazie va anche ai miei nonni *Tina* e *Bruno*. Anche se i rapporti sono quelli che sono vi voglio ringraziare per la forza che mi avete dato ad affrontare questa università visto che pensavate fosse una scuola solo per maschi e non adatta a me. Grazie nonna per tentare di ricostruire un rapporto con me..direi che siamo sulla buona strada.

Grazie alle mie due cugine: la *Lori* e la *Bea*. Grazie *Lori* per la tua saggezza e la tua secchionaggine, sei perfetta così come sei e ti ammiro per la tua forza di volontà. Grazie *Bebona*, siamo sempre state scambiate come sorelle in quanto siamo uguali sia per carattere (l'ignoranza è simile dai) che per aspetto. Grazie per essere così, grazie per raccontarmi tanti gossip e le tue varie avventure da donna “socialmente attiva”.

Un ringraziamento va ai miei animali, il mio cagnone *Sonny* detto “Jonny” e la mia gattona *Susy* detta “Gnugna”. Lo posso mettere per iscritto che anche loro potrebbero tranquillamente laurearsi in ingegneria perché hanno ascoltato tutte le volte che ripetevo e poveretti, dato che ero abbastanza noiosa, puntualmente si addormentavano. Grazie Gnugna per essere con me da quasi 14 anni, per essere la mia ombra, per farmi compagnia tutte le notti visto che il tuo posto nel mio letto lo sai è assicurato. Grazie Jonny per avermi fatto capire veramente cosa significa avere un cane. Sei tutto per me, i primi anni di vita sei stato tosto da gestire ma ormai sei diventato il mio cucciolone. Tutte le volte che mi vedi non stai nella pelle, solo il rumore della mia macchina ti fa andare in estasi. Grazie per tutto, per avermi insegnato la pazienza e cos'è l'amore che ti può dare un cane: immenso e indescrivibile. Per ultimi devo ringraziare la nuova arrivata in famiglia: il mio caro inseparabile *Tilla* che da pochi giorni ha imparato a volare e che è un essere alquanto curioso, intelligente e simpatico. Ed infine il cane di mio nonno, *Nicole*, il cane più dolce e buono che io abbia mai conosciuto.

Sicuramente un grazie speciale va alle amicizie con le quali è stato possibile staccare la spina, condividere i dispiaceri e festeggiare assieme gli esami passati.

Grazie al gruppo del beach volley del sabato e delle uscite, grazie a *Albi, Ale, Alice, Ari, Bucci, Cri, Davide, Gio, Mazza, Monga, Toz*.

Grazie *Alice* per essere sempre stata carina e disponibile nell'aiutarmi con la scuola, ma soprattutto grazie per farmi ridere grazie ai tuoi pensieri a dir poco strani come la droga presente nei croccantini per gatti e per non ricordare mai il nome del prof o addirittura storpiarlo. Grazie per le ore passate a giocare a beach, grazie per farmi venire il nervoso visto che sbagli le ricezioni solo quando sei in squadra con me. Spero che questa amicizia continui anche dopo la fine di questa università.

Grazie *Je*, che dire, ormai le nostre strade si sono un po' divise, ma spero che si possa ancora risolvere qualcosa. Grazie per gli aperitivi in cui mi fai mangiare tutto, grazie per avermi fatto vivere i tuoi momenti da sbronza..che già fai ridere da sana, da ubriaca è tutto un dire. Grazie per esserci stata in momenti un po' "così" per me e grazie per aver condiviso con me le gioie.

È di dovere ringraziare il gruppo che con me ha passato questi due meravigliosi ma difficili anni cioè *Ale, Alice, Alice, Erminia, Luca, Luca, Michael, Pinto, Riccardo e Tasso*. In particolare ringrazio il magnifico duo composto da *Pinto e Tasso*, grazie per essere così come siete, grazie per essere così cretini da far passare alla gente qualsiasi preoccupazione, grazie *Tasso* per essere stato la mia autostima portatile e grazie *Pinto* per essere talmente buono da essere preso in giro per i tuoi "bellissimi capelli" o per il tuo essere di origine napoletana. Grazie *Luca e Michael* per aver passato poche ma intense serate a Bologna. Grazie *Luca* per avermi fatto capire che le scuse per paccare ad un invito sono infinite (dai scherzo) però ti aspetto ancora al mare e grazie per la tua pazienza mostrata con noi donne, a volte siamo toste da sopportare.

Ora per ultimi, naturalmente non per importanza, vanno i ringraziamenti alle due persone che più con me hanno condiviso questi 6 anni universitari e di vita: un grazie importante va alla mia migliore amica *Ale* e al mio moroso *Luca*.

Grazie *Ale*, per essere stata di supporto per me in questi lunghi anni. Grazie per esserci sempre stata nel bene e nel male..lo so, soprattutto di prima mattina, sono una persona abbastanza pesante con un alternanza di umore impressionante. All'inizio non avrei mai pensato di poter stringere un'amicizia così forte con te, anche perché, lo sai, a pelle mi

stavi abbastanza antipatica. Poi, man mano che passavano i mesi, mi rendevo conto che su di te potevo contare. Ora sono passati anni da quel giorno, ormai vedevo più te che i miei famigliari e il mio moroso per motivi soprattutto di studio e, anche se è un segreto, di cazzate. Ti ricordi tutti quei pomeriggi passati a giocare alla wii poi quando tornavano a casa i tuoi dal lavoro veniva spento tutto e facevamo finta di studiare!!! Negli ultimi mesi gli impegni universitari si sono leggermente divisi e per questo i minuti gratis della Vodafone sono diventati pochi in quanto andavano a sostituire le ore che non passavamo più assieme. È inutile siamo diventate inseparabili, dal raccontarci le più cavolate al supportarci a vicenda nelle situazioni più critiche. Poi tutte quelle serate passate assieme in cui tu ricordi di essere stata bene e non aver bevuto ma..lasciamo stare che è meglio. Sei la persona più ansiosa che io abbia mai conosciuto (naturalmente dopo il tuo moroso) ma il raggiungimento della laurea è anche grazie a te. Grazie per avermi spronato e di avermi spiegato quelle assurde materie che per me erano incomprensibili. Grazie per avermi dato la forza e la voglia di andare a seguire quelle ore e ore di lezione che grazie alla tua compagnia passavano in un secondo. Grazie veramente per tutto. Diciamo che tu sei quella sorella che non ho mai avuto e spero di poter continuare ad avere questo rapporto per sempre.

Ora il ringraziamento va ad una persona che per quanto mi riguarda dovrebbe essere fatto santo: grazie *Luca* detto “topo”. Grazie per essere sempre stato presente, grazie per aver accettato e condiviso le mie priorità scolastiche, grazie per non essermi mai stato di intralcio ma bensì di supporto. Grazie per sopportarmi da ben 6 anni, grazie per essere cresciuto insieme a me, grazie perché sei diventato la mia persona. Grazie a te mi sono sempre sentita amata e nei momenti più bui con te tutto si risolveva e non sembrava più così tragico. Si lo so non sono così tranquilla come persona, infatti mio nonno ti da sempre del “poveretto” però alla fine siamo ancora qui.. Grazie per avermi fatto fare cose che a te facevano alquanto schifo, ma che hai fatto solo per farmi felice. Grazie per esserti riuscito a farti convincere nel prendere Sonny. Da quel giorno le nostre vite sono cambiate, siamo diventati i padroni di un cane speciale a cui vogliamo un bene dell’anima (anche se tu non lo fai vedere tanto lo so che ne sei innamorato). Grazie per farmi sentire sempre al primo posto quando io molte volte ti ho messo in secondo piano.

Grazie per essere diventato oltre al mio moroso, il mio complice, il mio migliore amico... Non saprei come fare senza di te. Grazie veramente per tutto!!!

Ed infine, ringrazio me stessa..perché il culo me lo sono fatta io!!!!!!!!!!