

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

**Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città**

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica



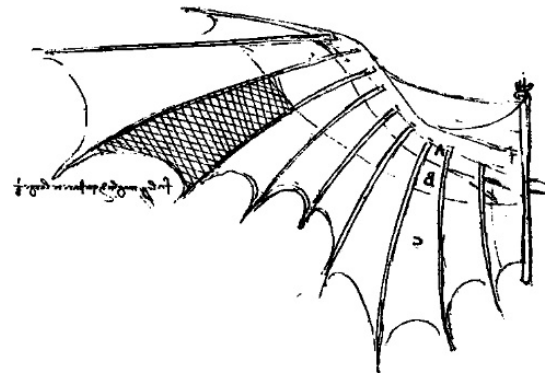
Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

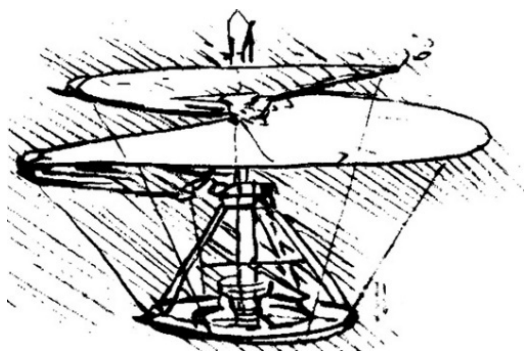
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017



*“Una volta che abbiate conosciuto il volo,
camminerete sulla terra guardando il cielo,
perché là siete stati e là desidererete tornare.”*

(Leonardo da Vinci)



Indice

Premessa	1
PARTE I - I cantieri edili in regime ordinario	5
1. Gli infortuni in edilizia: dati statistici e considerazioni culturali	6
1.1 Il ruolo dell'Unione Europea	6
1.2 Le statistiche europee sugli infortuni durante l'attività lavorativa	7
1.3 Gli infortuni nel settore edile in Europa	8
1.4 Gli infortuni nel settore edile in Italia	14
1.5 La cultura della sicurezza	17
2. Stato dell'arte sulle tecniche della Geomatica per la sicurezza nei cantieri	19
2.1 Utilizzo della tecnica LiDAR terrestre	20
<i>2.1.1 Laser scanner terrestre per la pianificazione della sicurezza negli scavi</i>	23
<i>2.1.2 Laser scanning per l'analisi dei punti ciechi dei mezzi di cantiere</i>	26
2.2 Utilizzo del Sistema di Posizionamento Globale	32
<i>2.2.1 Unità GPS implementate in elmetti protettivi e in macchine da cantiere</i>	35
<i>2.2.2 Utilizzo di dati GPS per la generazione di griglie di occupazione</i>	38
2.3 Utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici	41
<i>2.3.1 Geo database per la mappatura dell'amianto antropico</i>	42
<i>2.3.2 Utilizzo del GIS per l'identificazione e la risoluzione dei conflitti spaziali</i>	45
<i>2.3.3 Utilizzo del GIS per la generazione del layout di cantiere</i>	46
<i>2.3.4 Applicazioni GIS per la pianificazione della sequenza di esecuzione del progetto</i>	49

2.4 Utilizzo del Building Information Modeling	52
2.4.1 <i>Monitoraggio del cantiere</i>	53
2.4.2 <i>Utilizzo di Smartphone come sistema di allerta per la sicurezza</i>	54
2.5 Utilizzo di Aeromobili a Pilotaggio Remoto	56
2.5.1 <i>Valutazione sull'utilizzo della tecnologia drone come strumento di controllo della sicurezza</i>	57
2.5.2 <i>Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) per la sicurezza in edilizia</i> ...	66
2.5.3 <i>Valutazione delle prestazioni di Aeromobili a Pilotaggio Remoto per ispezioni sulla sicurezza</i>	69
3. Studio di valutazione sull'impiego dei droni per la sicurezza nei cantieri	76
3.1 Contesto normativo	76
3.2 Valutazione del rischio intrinseco	78
3.3 Il questionario	80
3.3.1 <i>Caratteristiche del campione</i>	81
3.3.2 <i>Analisi delle risposte</i>	85
4. Caso studio I – Un cantiere edile ordinario: approccio fotogrammetrico e cartografico per la valutazione dei rischi intrinseci e ambientali	89
4.1 La Fotogrammetria	90
4.1.1 <i>Principi generali della fotogrammetria</i>	90
4.1.2 <i>Acquisizione delle immagini per mezzo di aerei</i>	93
4.1.3 <i>Acquisizione delle immagini per mezzo di droni</i>	95
4.1.4 <i>Orientamento</i>	96
4.1.4.1 <i>Parametri interni di calibrazione</i>	97
4.1.4.2 <i>Parametri esterni di calibrazione</i>	98
4.1.4.3 <i>Ground Control Points e Real Time Kinematics</i>	99
4.1.5 <i>Sparse cloud – Nuvola sparsa</i>	102
4.1.6 <i>Dense cloud – Nuvola densa</i>	102

4.1.7 Mesh triangolata e mesh texturizzata	103
4.1.8 Modelli altimetrici e ortofoto	103
4.2 Rilievo fotogrammetrico da UAV	106
4.2.1 Raccolta dei dati	106
4.2.2 Elaborazione dei dati	110
4.2.3 Restituzione e fruizione del modello 3D	115
4.3 Workflow operativo per la valutazione dei rischi legati al contesto	118
4.3.1 <i>Caratteristiche intrinseche dell'area</i>	118
4.3.1.1 Descrizione e ubicazione dei lavori	118
4.3.1.2 Caratteristiche geomorfologiche del terreno	122
4.3.1.3 Vincoli di sottosuolo	125
4.3.1.4 Sottoservizi impiantistici	127
4.3.1.5 Vincoli di superficie inamovibili e preesistenze	127
4.3.1.6 Vincoli aerei	127
4.3.1.7 Condizioni climatiche	127
4.3.1.8 Vegetazione	127
4.3.1.9 Proiezione e cadute di masse verso l'interno del cantiere	128
4.3.1.10 Emissione di agenti inquinanti dall'ambiente verso il cantiere	129
4.3.2 <i>Impatto ambientale del cantiere</i>	129
4.3.2.1 Proiezione e cadute di masse all'esterno del cantiere	129
4.3.2.2 Emissione di agenti inquinanti dal cantiere verso l'ambiente circostante	129
4.3.3 <i>Interferenze con le condizioni di esercizio dell'area</i>	130
4.3.3.1 Interferenze con attività produttive e cantieri limitrofi	130
4.3.3.2 Interferenze con edifici limitrofi e viabilità al contorno	130

PARTE II - I cantieri di intervento in emergenza sismica	132
5. Geomatica e sicurezza nel disaster management.....	133
5.1 Il fenomeno sismico	134
5.2 Le scale di intensità e magnitudo	136
5.2.1 <i>La Scala Mercalli.....</i>	136
5.2.2 <i>La Scala Richter.....</i>	138
5.3 Il rischio sismico	140
5.3.1 <i>Le aree sismo genetiche</i>	141
5.3.2 <i>RAN - Rete Accelerometrica Nazionale</i>	142
5.3.3 <i>OSS - Osservatorio Sismico delle Strutture</i>	142
5.4 Storico dei terremoti in Italia	147
5.5 Analisi di damage assessment multitemporale	149
5.6 La topografia applicata al soccorso	150
6. Gli interventi urgenti di messa in sicurezza e i cantieri di ricostruzione nei luoghi del terremoto.....	153
6.1 I cantieri di ricostruzione post sisma	154
6.1.1 <i>La sicurezza dei lavoratori in caso di terremoto: i piani di emergenza</i>	154
6.1.2 <i>Metodologie di prevenzione</i>	155
6.1.2.1 <i>I diagrammi spazio-tempo e la Location Breakdown Structure</i>	155
6.1.2.2 <i>La mappatura dei rischi nel layout del cantiere</i>	155
6.1.2.3 <i>Il cronoprogramma operativo.....</i>	156
6.2 Gli interventi urgenti di messa in sicurezza	158
6.2.1 <i>Il Manuale Opere Provvisoriale e il Vademecum STOP</i>	160
6.2.2 <i>La gestione della sicurezza degli operatori</i>	161
6.2.3 <i>Operazioni pratiche di posa in opera di una struttura provvisoriale</i>	164

6.2.4 Estratto della scheda intervento C1 - Chiesa di San Felice Martire.....	168
6.2.5 Estratto della scheda intervento P2 - Chiesa di San Silvestro.....	169
7. Caso studio II – L'intervento tecnico urgente: Proposta di un metodo speditivo per il rilievo metrico in contesti emergenziali.....	170
7.1 Impiego di sistemi a scansione LiDAR negli interventi tecnici urgenti in emergenza sismica	172
7.2 Impiego di modelli fotogrammetrici digitali negli interventi tecnici urgenti in emergenza sismica	173
7.3 Confronto tra modelli generati mediante metodi di georiferimento per “Control Points” e per “Scale Bars”	174
7.4 Sperimentazione del metodo proposto sulla torre campanaria e sul portale principale del Duomo Vecchio di San Severino Marche.....	191
7.5 Esportazione dei dati metrici per la realizzazione delle opere provvisionali.....	215
Conclusioni.....	218
Lista degli acronimi.....	223
Bibliografia.....	227
Sitografia	231
Ringraziamenti	235

Premessa

Gli allarmanti dati statistici riguardanti gli infortuni sul lavoro, occorsi in Europa negli ultimi anni, collocano il settore delle costruzioni al primo posto per numero di incidenti mortali, e al terzo posto (dopo le attività manifatturiere e il commercio all'ingrosso e al dettaglio) per numero di infortuni non mortali (ISTAT, 2013). La natura interdisciplinare della Geomatica, con le sue tecniche di vitale importanza nella gestione delle informazioni spaziali georeferenziate, rappresenta una materia in cui emergono importanti relazioni con la progettazione e la gestione della sicurezza nei cantieri. Sebbene i contributi della Geomatica in questo campo non siano stati approfonditamente indagati, questa tesi si pone l'obiettivo di metterli in evidenza.

Anche nei casi in cui il patrimonio costruito è stato oggetto di danneggiamenti causati da disastri naturali, come i terremoti, è necessario pianificare in sicurezza le azioni di monitoraggio e intervento sugli edifici. Realizzare interventi tecnici urgenti in emergenza sismica è un'attività ben diversa dal progettare cantieri ordinari, poiché comporta rischi aggiuntivi per la sicurezza degli operatori. Grazie alla diffusione dei droni, insieme al miglioramento dei software di fotogrammetria e degli algoritmi di *image-matching*, negli ultimi anni le soluzioni della Geomatica hanno attivamente contribuito in questo campo, supportando le attività di documentazione spedite, accurata ed economica dei danni subiti dal patrimonio edilizio, storico e culturale.

Le motivazioni alla base di questa ricerca risiedono in un interesse personale verso gli argomenti trattati, maturato durante il corso dei miei studi presso il Politecnico di Torino. Il corso di Sicurezza nei cantieri mi ha fornito il requisito professionale per poter svolgere l'attività di coordinatore per la sicurezza nei cantieri temporanei o mobili, preparandomi alla gestione della sicurezza nelle fasi realizzative dei progetti, nella nuova edificazione come nel recupero dell'edilizia esistente. Il Laboratorio di Geomatica per i Beni culturali e le attività svolte con il Team DIRECT mi hanno formato sui fondamenti teorici ed i necessari ambiti applicativi dei moderni metodi e tecniche strumentali di rilievo topografico e fotogrammetrico.

L'analisi sviluppata nella prima parte di questo lavoro intende fornire un contributo specifico volto sia alle figure dei coordinatori per la sicurezza in fase di progettazione e/o di esecuzione (architetti, ingegneri e geometri), che a tutte le altre figure del mondo del lavoro coinvolte nella sfera della sicurezza, come i datori di lavoro e gli organi di vigilanza.

La parte iniziale della tesi è costituita da un'analisi statistica sugli infortuni nell'Unione Europea, in riferimento al settore delle costruzioni. Viene in seguito presentato lo stato dell'arte, e illustrati i moderni mezzi e le recenti tecniche riguardanti soprattutto le applicazioni della Geomatica per la sicurezza in edilizia; una raccolta e un'analisi di alcuni lavori di ricerca, esempi pratici e innovativi che vengono commentati e rapportati alle tradizionali prassi operative. È stato poi condotto uno studio valutativo sull'impiego dei droni per il controllo dei parametri di sicurezza nei processi edilizi, considerando anche i rischi intrinseci derivanti dall'utilizzo di tali strumenti in prossimità di persone. I risultati di un test, somministrato a coordinatori per la sicurezza e tecnici della prevenzione nell'ambiente e nei luoghi di lavoro, hanno fornito indicazioni sui potenziali impieghi di questa tecnologia nel settore edile in Italia.

Per quanto concerne i cantieri tradizionali, è stata condotta una campagna di acquisizione aerofotogrammetrica volta alla creazione di un modello 3D di un cantiere. Il modello generato ha permesso di compiere misurazioni e osservazioni affidabili in tempo reale, configurandosi come strumento aggiuntivo alla valutazione dei rischi. Utilizzando i moderni strumenti cartografici e i metadati GIS disponibili online, è stato proposto un workflow operativo che analizza e individua tutti i fattori di rischio connessi al sito, ossia le condizioni del contesto potenzialmente interferenti con l'esecuzione dei lavori in sicurezza.

La seconda parte di questa di tesi è in particolar modo dedicata ad elaborare un possibile supporto utile al Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e agli interventi urgenti di messa in sicurezza nell'immediato post sisma. Viene in questa parte approfondita la tematica del *disaster management* e il ruolo della Geomatica nelle operazioni di *damage assessment*.

Per quanto riguarda i cantieri urgenti in emergenza sismica, data l'esigenza di ridurre i tempi di permanenza degli operatori nelle zone pericolose, lo studio è stato indirizzato verso un approccio *image-based*, sperimentando un metodo di acquisizione speditivo che differisse dai metodi di rilievo fotogrammetrico consolidati. Nell'ottica di proporre una soluzione rapida, economica e di facile applicazione, si è deciso di proporre un metodo di georiferimento mediante *scale bars* di modelli fotogrammetrici digitali, generati tramite dati raccolti utilizzando sensori aerei low-cost.

Il caso studio selezionato si colloca nella campagna di acquisizione dati condotta dal Team DIRECT (DISaster RECOVERY Team) del Politecnico di Torino, nell'ambito di un progetto che ha coinvolto l'Ateneo in attività di documentazione delle aree del centro Italia, colpite dallo sciame sismico dell'agosto 2016. Dopo aver dimostrato l'efficacia del metodo proposto, testato

sul portale romanico-gotico situato nel chiostro del complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC), si è deciso di procedere con un'applicazione sperimentale sulle operazioni di rilievo metrico finalizzate alla progettazione di opere provvisorie, funzionali sia alla torre campanaria che al portale principale dello stesso complesso architettonico.

Da questa tesi è emerso che il rilievo a distanza garantisce la massima condizione di sicurezza per gli operatori; l'impiego di sensori *low cost*, specie quelli legati alla fotogrammetria aerea, costituiscono un buon compromesso tra accuratezza e tempi di acquisizione dei dati metrici. Inoltre questi sistemi si stanno dimostrando affidabili in condizione di emergenza, soprattutto nell'acquisizione e nella gestione di una grande quantità di dati. I modelli 3D e le *texture* di elevata qualità, estratti in fase di post elaborazione dei dati, possono essere condivisi tramite piattaforme open source, garantendo una progettazione partecipativa, sia in cantieri ordinari che in contesti emergenziali.

Parte I
I cantieri edili in regime ordinario

1. Gli infortuni in edilizia: dati statistici e considerazioni culturali

Questo capitolo tratta gli indicatori statistici principali riguardanti gli infortuni sul lavoro (mortalità e non) avvenuti negli ultimi anni nell'Unione Europea, con particolare riferimento al settore delle costruzioni. Vengono infine fatte alcune considerazioni culturali legate agli elevati tassi infortunistici in edilizia rispetto agli altri settori produttivi.

Un **incidente sul lavoro** è definito come un evento in cui, durante il corso dell'attività lavorativa, si verifica un danno fisico o mentale. Gli **infortuni mortali** sono quelli che conducono alla morte della vittima nel giro di un anno. Gli **infortuni non mortali** sono quelli che invece implicano almeno 4 giorni di assenza dal lavoro; spesso gli infortuni costituiscono seri problemi per il lavoratore coinvolto e per la sua famiglia e, a volte, conducono a condizioni di disabilità permanente, alla necessità di interrompere la vita lavorativa o di cambiare lavoro.

La **malattia professionale** (di cui non ci occuperemo in questa tesi) è invece quella malattia contratta dal lavoratore nell'esercizio della propria attività lavorativa, a causa di fattori presenti nell'ambiente nel quale presta servizio. Si distingue dall'infortunio in quanto l'infortunio è un evento immediato, e che quindi incide istantaneamente sul lavoratore come fatto traumatico.

La salute è un'importante priorità per gli europei, che si aspettano di avere una vita lunga e in salute, di essere protetti contro malattie e incidenti, e di ricevere cure appropriate. I problemi sanitari riguardano un vasto spettro di argomenti, includendo la sicurezza alimentare, la sicurezza degli ambienti e dei luoghi di lavoro, le politiche sociali e ambientali.

Un ambiente di lavoro sicuro è un fattore cruciale nella qualità della vita dell'individuo e anche una preoccupazione collettiva. Gli stati membri dell'Unione Europea riconoscono il beneficio sociale ed economico della salute dei lavoratori.

1.1 Il ruolo dell'Unione Europea

L'Unione Europea ha il compito di integrare le iniziative nazionali sulla sanità; questo significa prevalentemente proteggere le persone dalle malattie, promuovere stili di vita salutari e aiutare le autorità nazionali a cooperare con l'UE sui problemi della salute.

Un primo programma comunitario sulla salute pubblica ha coperto un periodo dal 2003 al 2008. Nell'ottobre 2007 la Commissione Europea adottò un secondo programma "*Togheter*

For Health: a strategic approach for the EU 2008-2013". Nel marzo 2014, è stato varato il terzo programma UE valevole per il periodo 2014-2020 con il titolo "*Health for Growth*". Questo nuovo programma enfatizza i collegamenti tra la salute e la prosperità economica, dal momento che la salute dell'individuo influenza direttamente fattori economici come la produttività e la qualità del capitale umano. Il programma prevede un fondo di 450 milioni di euro sul periodo di sette anni, erogati in forma di finanziamenti e sovvenzioni pubbliche.

Riguardo le politiche comunitarie sulla sicurezza, il ruolo dell'UE è di supportare le attività degli stati membri nel migliorare le condizioni degli ambienti di lavoro al fine di proteggere la salute e la sicurezza dei lavoratori. Gli obiettivi della Commissione Europea per il periodo 2014-2020 sono quelli di migliorare le normative in materia di salute e sicurezza, di migliorare la prevenzione di malattie lavoro-correlate, identificando rischi nuovi ed emergenti senza ignorare quelli esistenti, considerata anche l'età anagrafica media della forza lavoro europea (EUROSTAT, 2016).

1.2 Le statistiche europee sugli infortuni durante l'attività lavorativa

Nel dicembre 2008, il Parlamento e il Consiglio Europeo hanno adottato il regolamento 1338/2008 riguardante le statistiche sulla salute pubblica e sulla salute e sicurezza sul lavoro. Il regolamento è progettato in modo da assicurare che le statistiche forniscano adeguate informazioni riguardo gli stati membri per monitorare le azioni da intraprendere (EUROSTAT, 2016).

Nel 2014 ci sono stati circa 3,2 milioni di infortuni non mortali, considerando gli infortuni che hanno portato ad almeno 4 giorni di assenza dal lavoro, e 3.739 incidenti mortali, con un rapporto di circa 850 infortuni non mortali per ogni infortunio mortale.

Si è verificato un leggero incremento del numero di incidenti in Europa tra il 2013 e il 2014, con 49.000 infortuni non mortali e 65 infortuni mortali in più. La lettura dei dati INAIL in un'ottica di genere mostra che uomini sono più esposti delle donne ad avere infortuni sul lavoro; più di due terzi degli infortuni non mortali hanno infatti coinvolto uomini. "La gestione dell'industria e dei servizi, in cui si concentra il fenomeno infortunistico sia per le donne (86%) sia per gli uomini (91%), mostra però una sostanziale differenza dei sessi in termini di distribuzione per settori di attività economica, con una maggiore concentrazione delle donne nelle attività meno rischiose dei servizi (70% contro 40%)" (INAIL, 2013).

Il numero di incidenti sul lavoro varia ampiamente in base all'attività economica in questione. I settori delle costruzioni, del trasporto e magazzinaggio, della manifattura, dell'agricoltura e

della pesca contano insieme i due terzi di tutti gli infortuni mortali, e quasi la metà di quelli non mortali. In particolare, come mostrato nel grafico 1.1, **più di un incidente mortale su cinque in Europa è avvenuto nel settore delle costruzioni** (EUROSTAT, 2016).

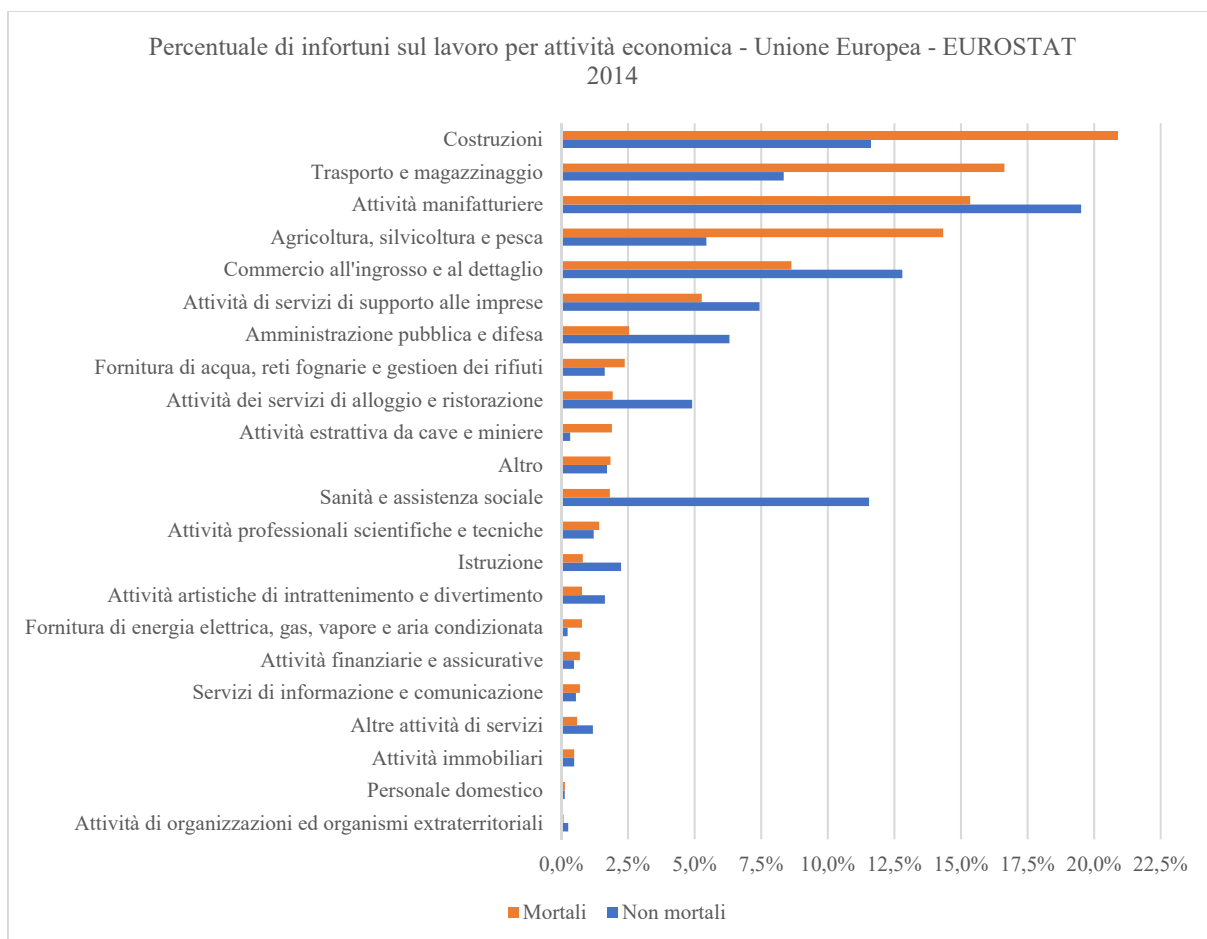


Grafico 1.1: Distribuzione percentuale di infortuni occorsi in Europa nel 2014 tra le varie attività economiche. Il settore delle costruzioni è il primo per infortuni mortali e il terzo per infortuni non mortali.

1.3 Gli infortuni nel settore edile in Europa

Dalle analisi relative al 2014, emerge che il settore di attività maggiormente colpito è quello delle costruzioni, con l'Italia al secondo posto per numero di infortuni mortali (Grafico 1.2).

Il numero di incidenti in un particolare anno è da rapportare al livello medio dell'attività economica, ossia al numero di personale impiegato. Un'analisi storica rivela che gli incidenti dal 2009 sono diminuiti, e questo può essere attribuito a un recesso dell'attività economica associato alla crisi finanziaria globale. Si osservano dati particolarmente bassi riguardo incidenti non mortali in Bulgaria e Romania, questo dato potrebbe riflettere una condizione in cui alcuni

Stati Membri offrono pochi o nessun incentivo alle vittime di incidenti che denunciano l'accaduto. Il fenomeno non può però replicarsi per gli incidenti fatali, in cui è molto più difficile non denunciare il sinistro (Ministero della Salute, 2014).

L'analisi mostra una **significativa flessione degli infortuni** totali e mortali, in atto ormai da diversi anni. Il trend è confortante in quanto continua a diminuire anche il dato degli infortuni rapportato al totale degli occupati.

I grafici seguenti restituiscono il panorama europeo degli infortuni nel settore edile (grafici 1.3 e 1.4). È importante tuttavia analizzare non solo il numero assoluto di infortuni, ma anche i tassi standardizzati di incidenza infortunistica (dato normalizzato su 100.000 occupati). Questo permette di confrontare gli Stati Membri a prescindere dalla quantità totale di occupati in un determinato settore (grafici 1.5 e 1.6).

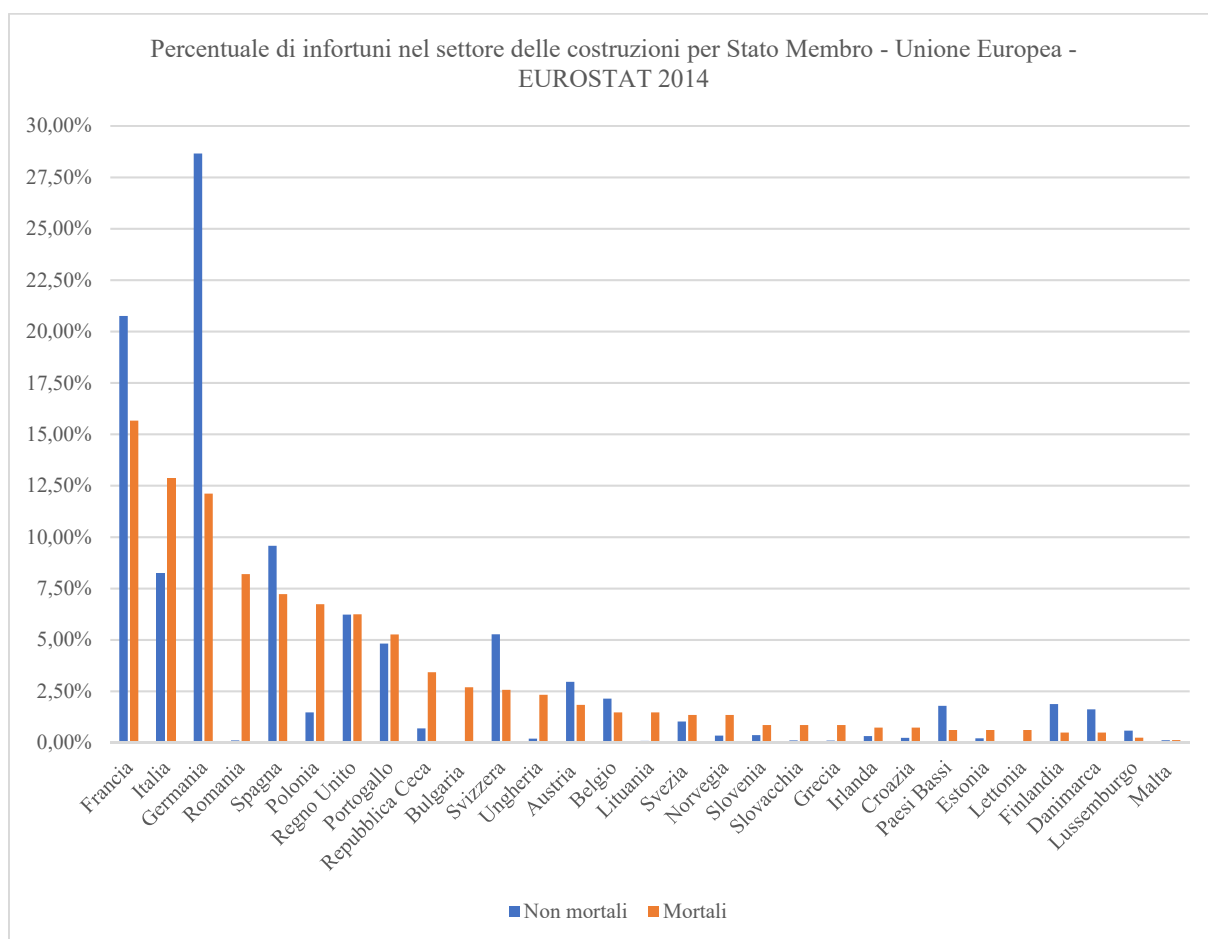


Grafico 1.2: Distribuzione percentuale di infortuni nel settore edile per Stato Membro nel 2014. L'Italia si colloca al secondo posto per numero assoluto di infortuni mortali.

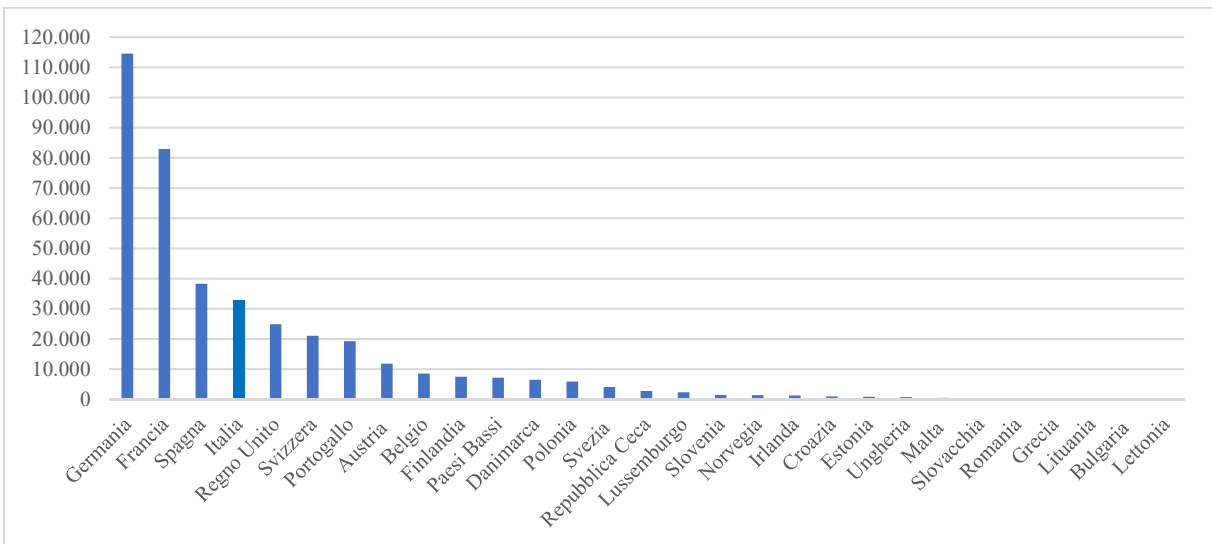
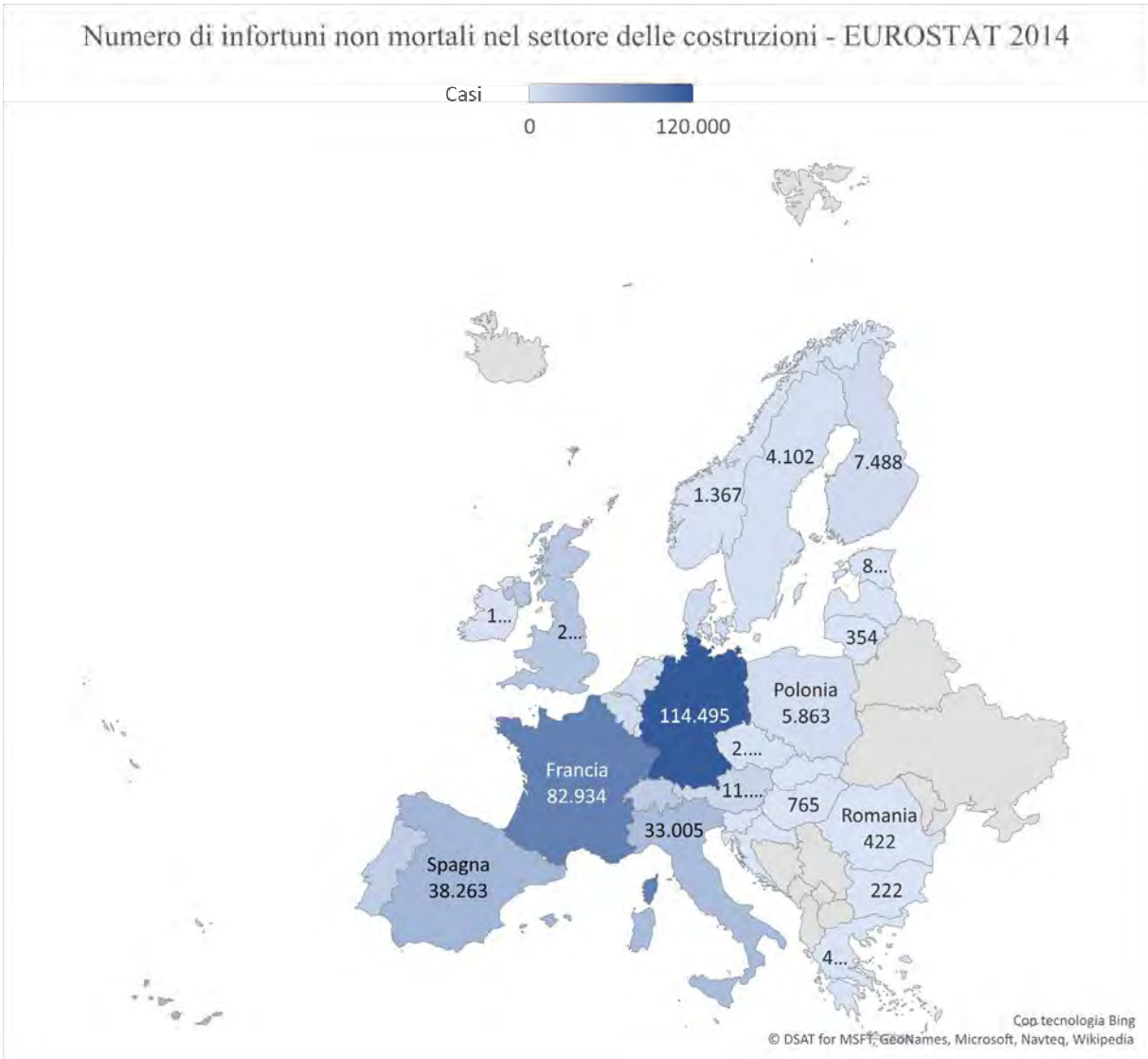


Grafico 1.3: Numero di infortuni non mortali occorsi nel settore edile per ogni Stato Membro nell'anno 2014.

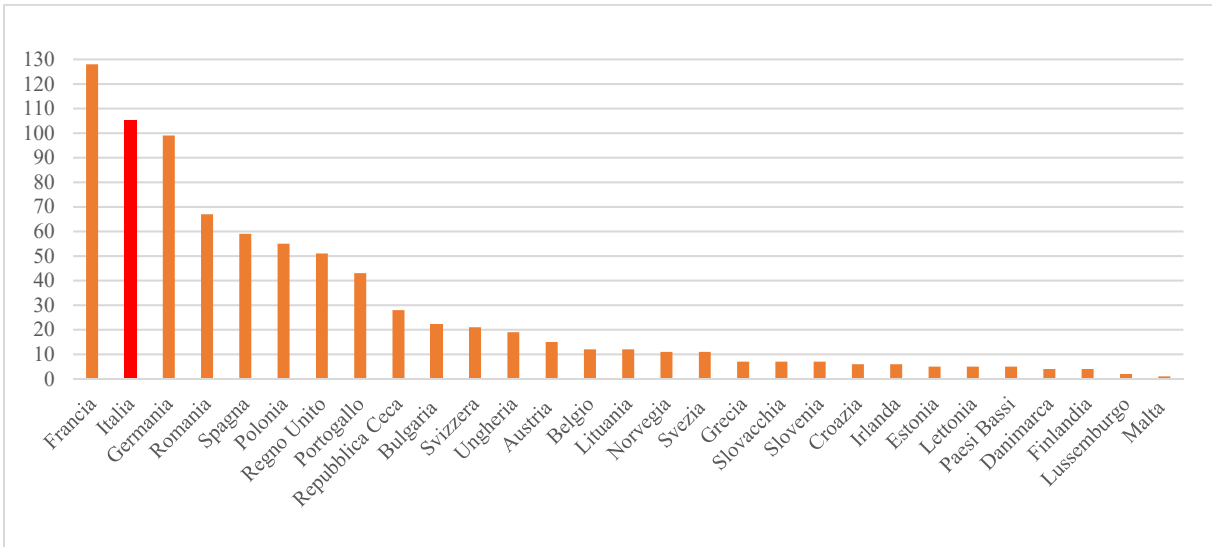
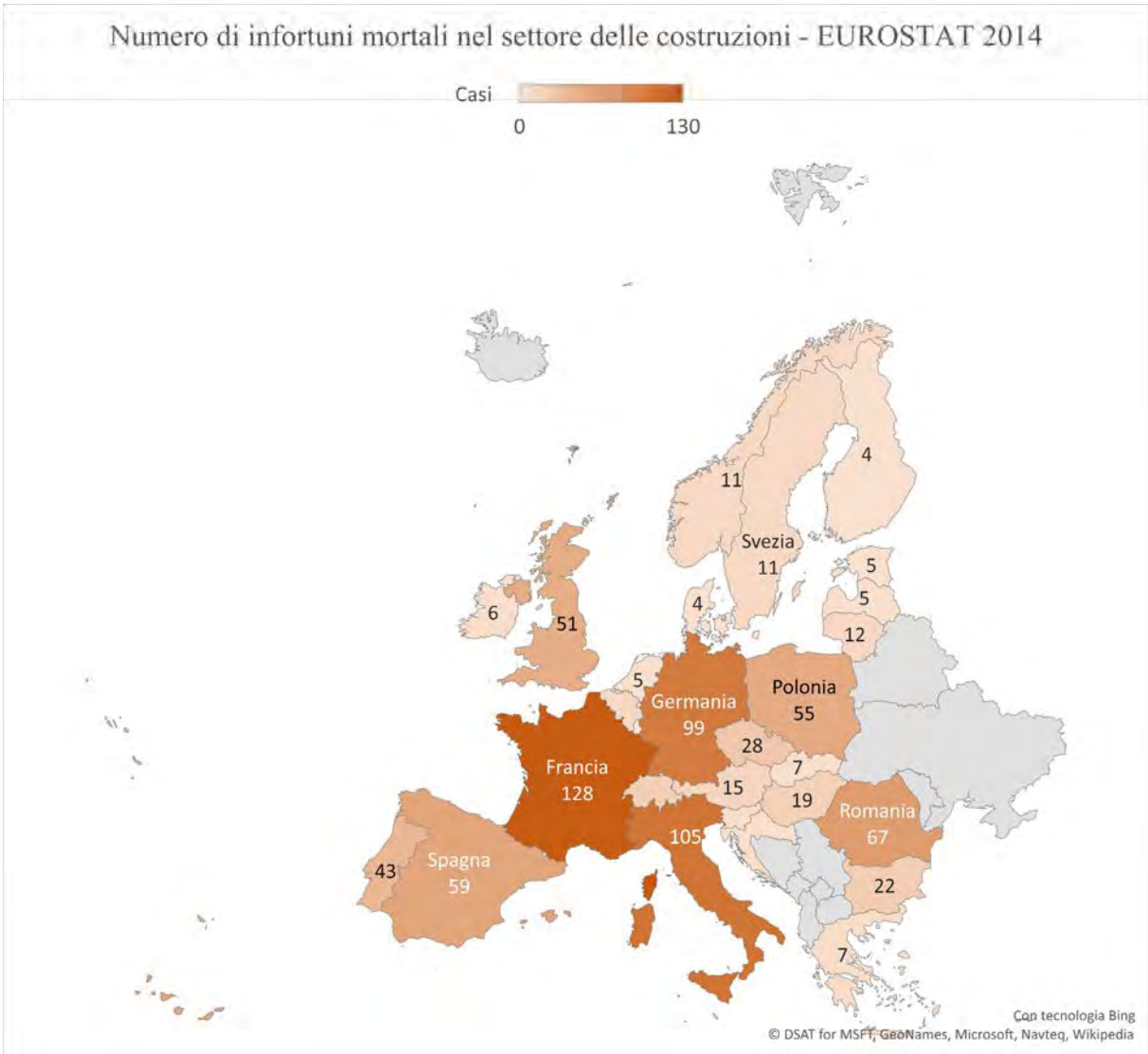


Grafico 1.4: Numero di infortuni mortali occorsi nel settore edile per ogni Stato Membro nell'anno 2014.

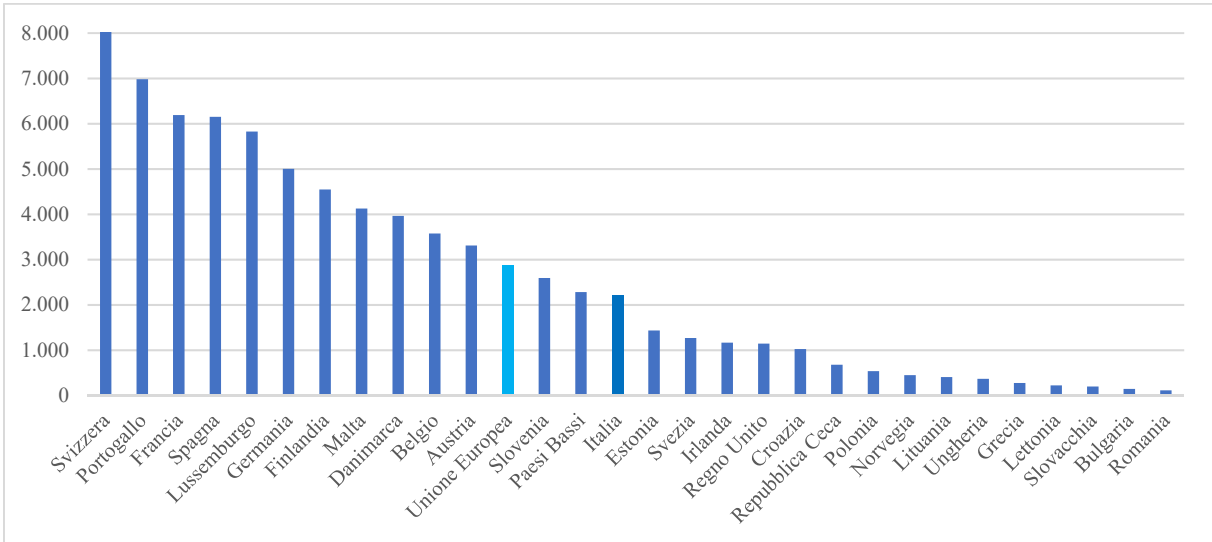
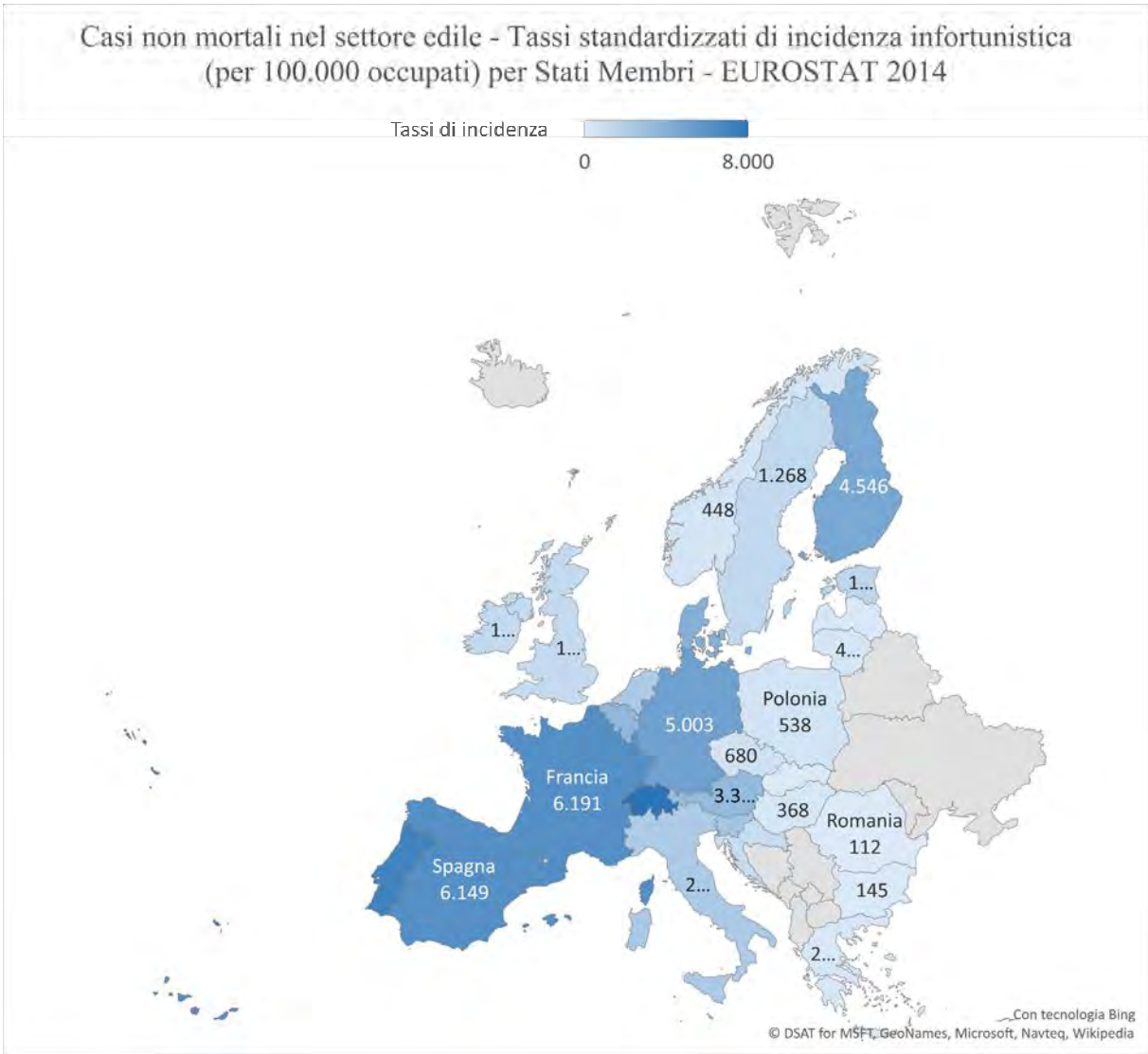


Grafico 1.5: Tassi standardizzati di incidenza infortunistica (infortuni non mortali) per 100.000 occupati nel settore edile, occorsi negli Stati Membri nell'anno 2014.

Casi mortali nel settore edile - Tassi standardizzati di incidenza infortunistica (per 100.000 occupati) per Stati Membri - EUROSTAT 2014

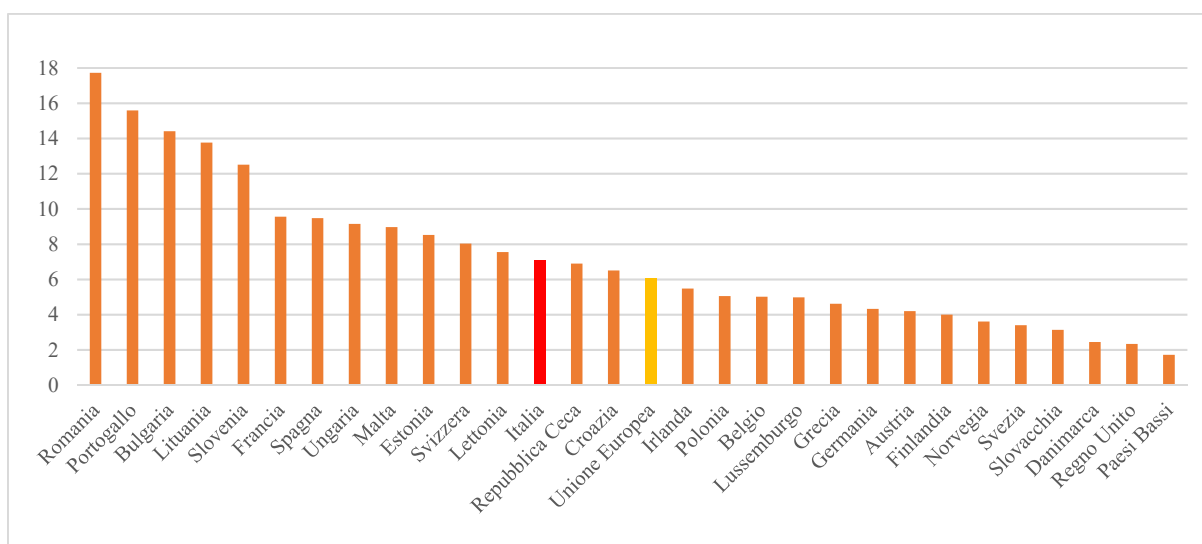
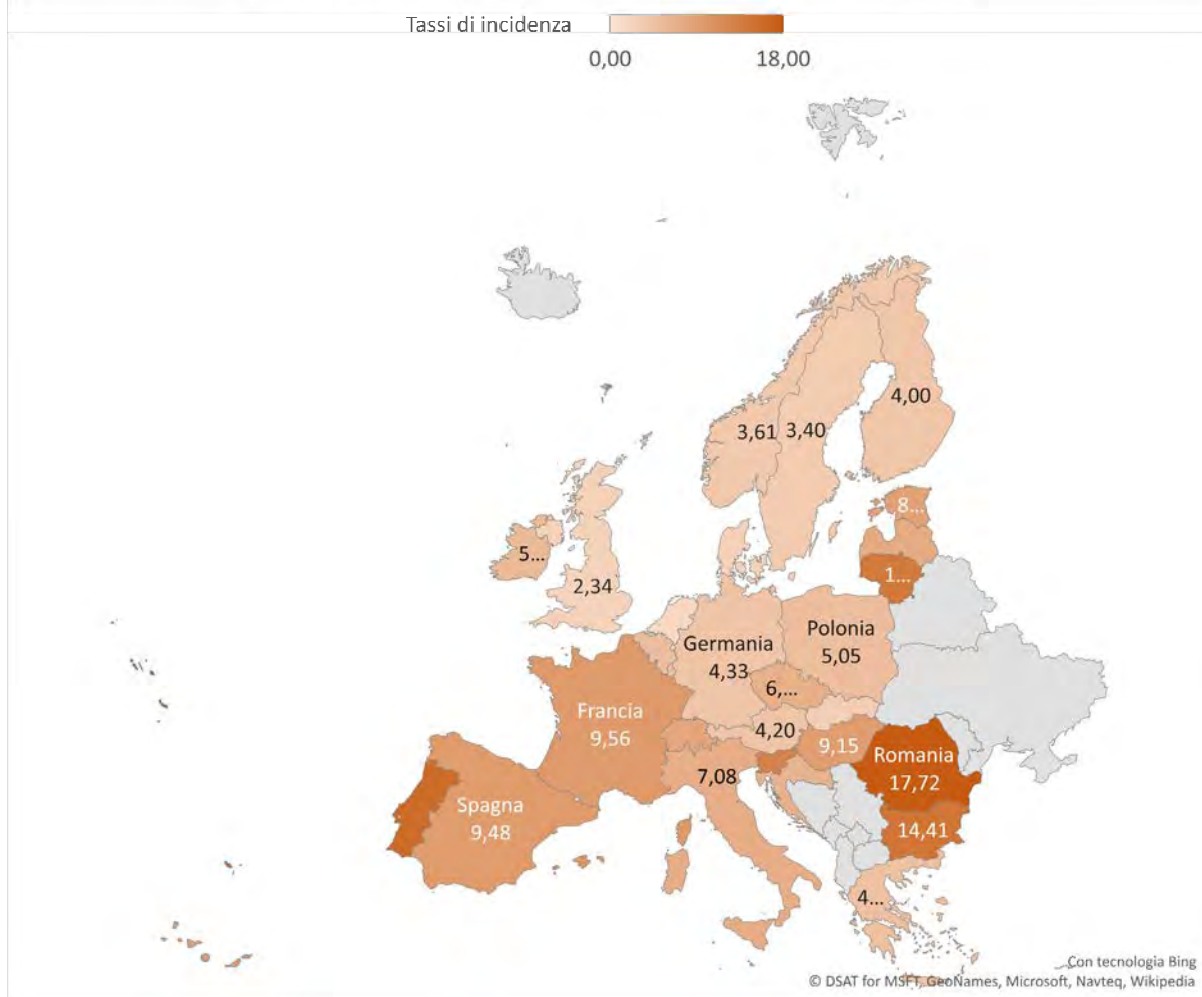


Grafico 1.6: Tassi standardizzati di incidenza infortunistica (infortuni mortali) per 100.000 occupati nel settore edile, occorsi negli Stati Membri nell'anno 2014.

1.4 Gli infortuni nel settore edile in Italia

I recenti dati non lasciano spazio all'immaginazione. Se da un lato è vero che il numero di infortuni nel settore delle costruzioni in Italia è in continua diminuzione, con dei valori più che dimezzati negli ultimi 5 anni (Grafico 1.7), è altresì vero che la congiuntura economica ha determinato una diminuzione dei lavoratori nel settore; pertanto, come già fatto precedentemente per il quadro europeo, è necessario analizzare i casi di infortuni osservando i tassi standardizzati di incidenza infortunistica per 100.000 occupati (Grafico 1.8). Si osserva che, seppur attestandoci a partire dal 2009 sotto la media europea, il recente trend sembra stazionare sui 2.250 infortuni ogni 100.000 addetti circa.

L'analisi degli infortuni mortali in Italia avviene tramite il Sistema di sorveglianza Infor.MO. (Grafico 1.9). L'infortunio che si verifica più frequentemente è la caduta dall'alto con il 52,4% degli incidenti. "Si evidenzia che nel 30,8% dei casi la caduta è avvenuta da tetti o coperture, nel 23,9% da attrezzature per lavori in quota (es. scale portatili, trabattelli, ponteggi) e nel 15,9% da parti in quota di edificio (es. terrazzi, parapetti, aperture). Seguono a distanza le macchine da sollevamento (5,8%). Per quanto riguarda la dimensione delle aziende in cui tali episodi si sono verificati si evidenzia che le cadute dall'alto sono avvenute in oltre il 71% dei casi in imprese aventi fino a 9 addetti. Tale dato rimanda alla marcata presenza di microimprese nel settore dell'edilizia, un aspetto comunque comune all'intera realtà produttiva italiana" (Sistema di sorveglianza degli infortuni mortali sul lavoro, 2017). In questo caso il tasso di incidenza mortale si attesta sopra la media europea con un trend leggermente in crescita dal 2012 (Grafico 1.10).

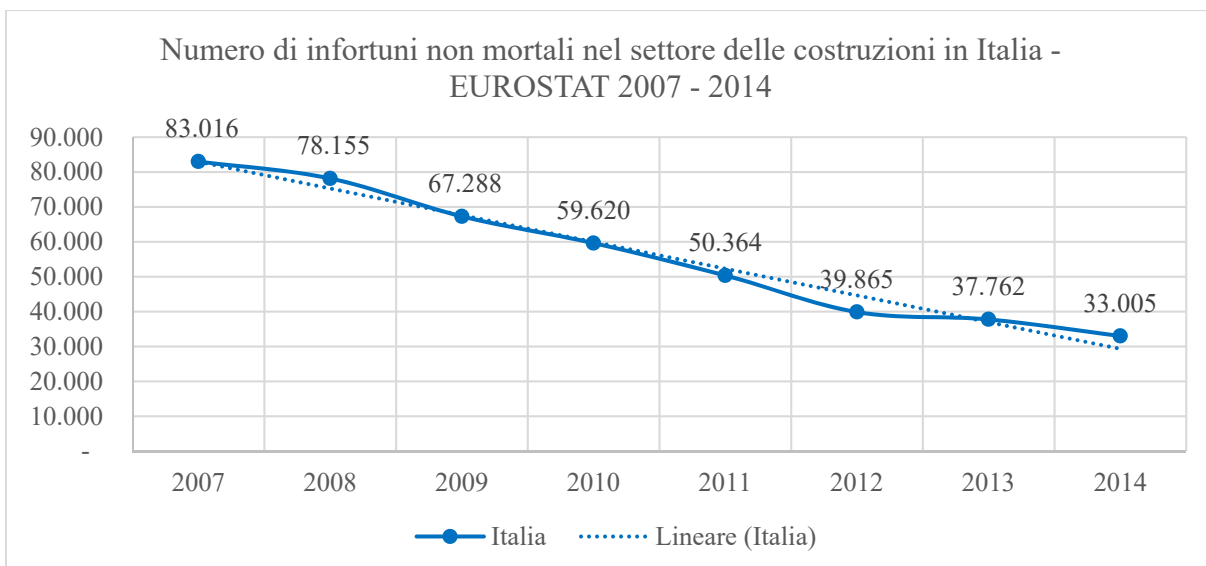


Grafico 1.7: Numero di infortuni non mortali riguardanti il settore edile occorsi in Italia tra gli anni 2007 e 2014.

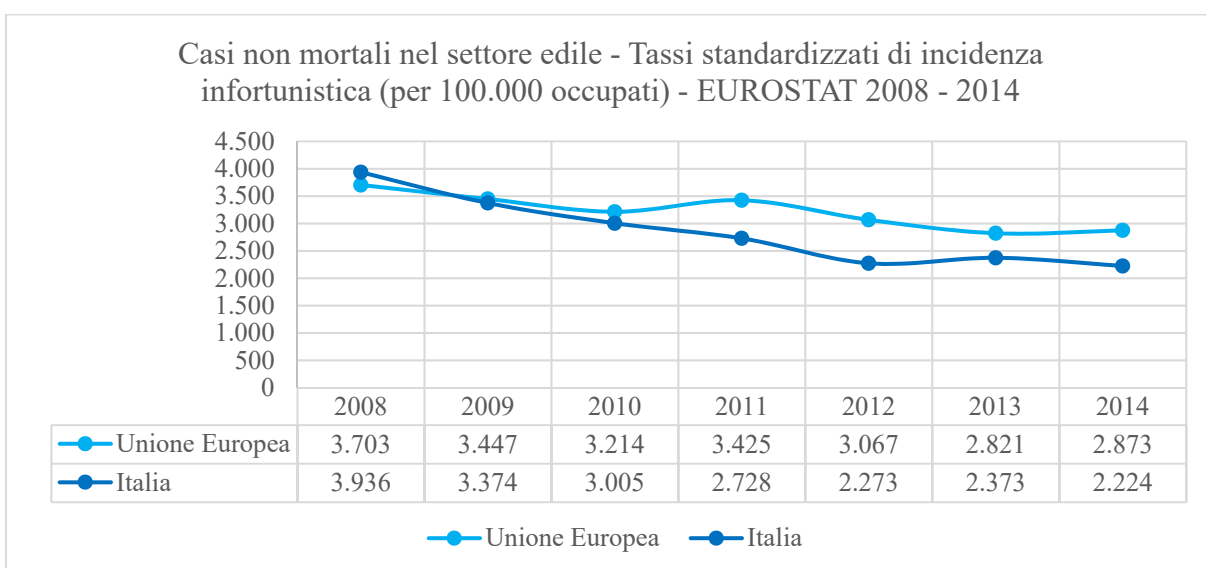


Grafico 1.8: Comparazione tra i tassi standardizzati di incidenza infortunistica non mortale in Italia (blu scuro) con la media europea (celeste) per un intervallo di anni compresi tra il 2008 e il 2014.

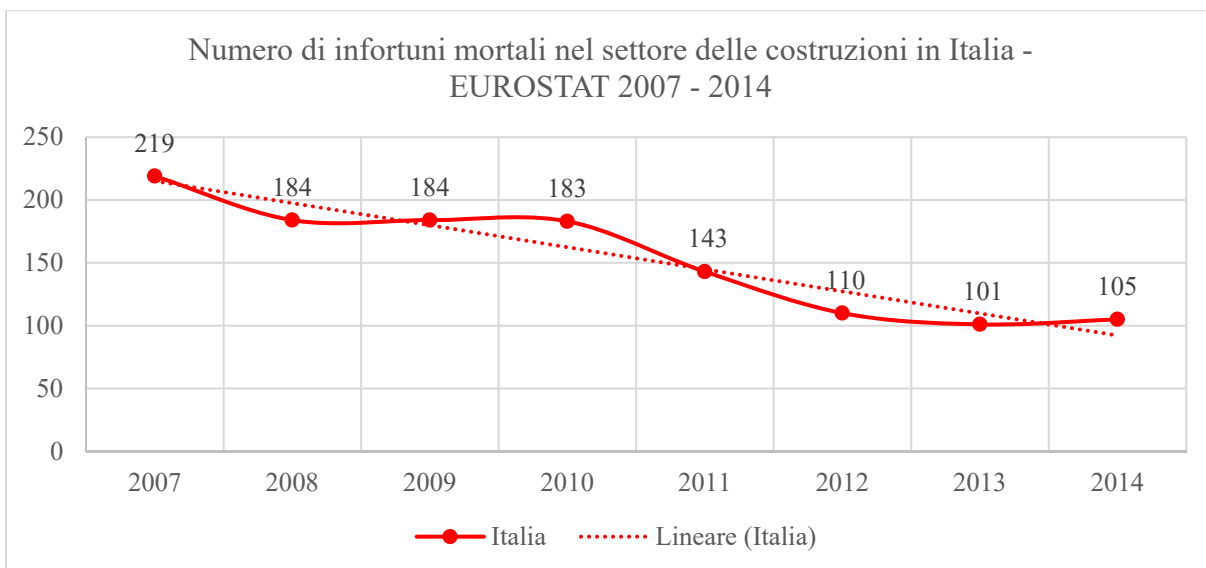


Grafico 1.9: Numero di infortuni mortali riguardanti il settore edile occorsi in Italia tra gli anni 2007 e 2014.

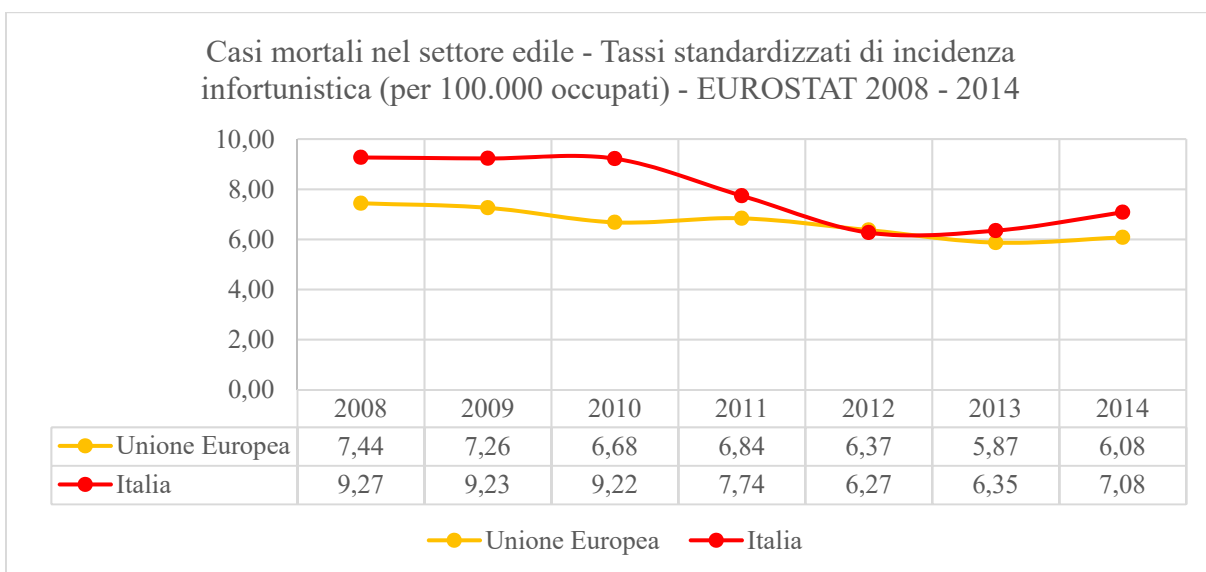


Grafico 1.10: Comparazione tra i tassi standardizzati di incidenza infortunistica mortale in Italia (rosso) con la media europea (arancione) per un intervallo di anni compresi tra il 2008 e il 2014.

1.5 La cultura della sicurezza

Alla base dell'elevata incidenza infortunistica in questo settore risiedono, probabilmente, diversi motivi; il settore edile è rimasto ampiamente indietro, rispetto agli altri settori produttivi, soprattutto nell'adozione di nuove tecnologie di automazione che possano permettere, come avvenuto ad esempio nel settore automotive, di sostituire le macchine all'uomo per le lavorazioni più rischiose (Figura 1.1). La risorsa più preziosa dell'industria delle costruzioni è costituita infatti tutt'oggi dagli operai; risulta pertanto un investimento saggio, oltre che un'ottemperanza alle normative vigenti, adottare tutti gli accorgimenti permessi dal progresso della tecnica per tutelare la salute e la sicurezza dei lavoratori (Figura 1.2).

Oltre ad una questione tecnologica, un'altra criticità risiede nel fatto che al giorno d'oggi manchi un approccio ben strutturato volto a raccogliere, formalizzare e riutilizzare uno storico di informazioni specifiche per le varie attività lavorative (know-how). Siamo di fronte dunque ad una sotto pianificazione e ad una carenza in risorse rispetto a ogni altro tipo di industria; i cantieri sono luoghi molto affollati dove i cambiamenti delle condizioni sono molto difficili da prevedere prima e durante i lavori. La carente sicurezza, anche in assenza di incidenti, è un aspetto che può influenzare sia fisicamente ma anche psicologicamente i lavoratori, condizionando temporalmente e quindi economicamente l'esecuzione dei lavori.

Al giorno d'oggi la sicurezza è applicata prevalentemente in maniera reattiva e non proattiva. La sicurezza non può essere garantita solamente dall'applicazione della normativa "sulla carta"; il rischio non è infatti quasi mai del tutto eliminabile ma solamente riducibile ed il compito del safety manager è proprio quello di ridurre se non eliminare del tutto il rischio residuo. Il progettista gioca un ruolo fondamentale nel ridurre l'incidenza infortunistica e la sua responsabilità è quella di fornire ogni volta un progetto realizzabile in maniera sicura.

La pianificazione della sicurezza del cantiere avviene spesso attraverso le tavole di progetto; Il progettista della sicurezza deve essere coinvolto nell'analisi dei disegni, per poter comprendere appieno tutte le procedure e produrre conseguentemente un piano di sicurezza per ogni fase, definendo un cronoprogramma dei lavori che possa permettere l'esecuzione in sicurezza ed efficienza. L'interpretazione della sequenza costruttiva rispetto all'identificazione dei rischi varia in base al livello di esperienza, conoscenza e prospettiva individuale del safety planner. Identificare i rischi e i pericoli è la parte più importante di questo lavoro in quanto una leggerezza in questa fase è indice del fatto che la sequenza costruttiva non è stata correttamente investigata.



Figura 1.1: Lunch atop a Skyscraper (Fonte: Ebbets, 1932). La famosissima foto ritrae undici lavoratori seduti su una trave sospesa a 240 metri dal suolo. La foto è stata scattata a New York al sessantanovesimo piano del GE Building (ex RCA Building).



Figura 1.2: Lunch atop a Skyscraper (Fonte: Crompton, 2011). Nel 2011, alcuni ingegneri edili a Londra hanno replicato la storica foto del '32, questa volta con giubbotti ad alta visibilità e funi di sicurezza, su una trave sospesa a 230 m di altezza.

2. Stato dell'arte sulle tecniche della Geomatica per la sicurezza nei cantieri

Il presente capitolo illustra lo stato dell'arte, inteso come il livello a cui sono giunte le conoscenze e le sperimentazioni, dei metodi e delle tecniche della Geomatica in applicazioni inerenti la sicurezza nei cantieri edili.

Gli strumenti sviluppati per assistere il safety manager nella fase di progettazione ed esecuzione sono infatti diversi, e le tecnologie digitali, come database online, Virtual Reality, GIS, 4D CAD, BIM e sensori di allerta sono ampiamente applicati oggi nei campi della prevenzione dei rischi infortunistici. Le tecnologie sono spesso combinate tra di loro e attingono a dati acquisiti tramite vari strumenti (acquisizioni multi sensore).

Risulta in evidente che gli studi condotti e riportati in questo capitolo, per loro complessità e difficoltà di realizzazione nell'edilizia tradizionale, trovano nella maggior parte dei casi applicazioni in contesti di ricerca, o nei soli casi di realizzazione di progetti di una certa portata, in cui cioè le ricadute economiche che si hanno investendo in determinati strumenti e tecnologie sono superiori alle spese sostenute per introdurli.

Bisogna tuttavia considerare che queste tecnologie hanno trovato, soprattutto negli ultimi anni, una diffusione capillare anche nelle realtà delle piccole e medie imprese. Come anche in altri settori, seppur ancora molto lentamente, le metodologie di controllo dei processi edilizi subiscono l'evoluzione conseguente il progresso della tecnica e della tecnologia.

Preliminarmente verranno trattati i metodi di acquisizione dei dati, tramite laser scanner e ricevitori GPS. Successivamente verranno analizzati i metodi di gestione dei dati precedentemente acquisiti, mediante sistemi GIS e applicativi BIM.

Alla fine del capitolo vengono presentate alcune recenti sperimentazioni riguardanti l'impiego di droni per applicazioni inerenti la sicurezza nei cantieri. È importante precisare che tali sperimentazioni sono caratterizzate da un approccio fotografico e non fotogrammetrico, come invece avverrà nei due casi studio illustrati nei capitoli successivi di questa tesi.

2.1 Utilizzo della tecnica LiDAR terrestre

LiDAR è un metodo di rilievo che misura le distanze da un target utilizzando una luce laser. Il nome lidar è spesso considerato come acronimo di Light Detection And Ranging o Light Imaging, Detection And Ranging. È molto utilizzato per la realizzazione di mappe ad alte risoluzioni per applicazioni di geodesia, sismologia, Geomatica, geomorfologia, archeologia, geologia e geografia. A questo termine sono associati il laser scanner e lo scanner 3D con applicazioni terrestri o aeree.

Questa tecnica ha origine all'inizio degli anni '60, poco dopo la scoperta del laser, ed è oggi considerata un apporto fondamentale al processo di rilievo geometrico. La tecnica LiDAR si basa sul metodo di misurazione delle distanze attraverso l'emissione di luce coerente tramite il fenomeno dell'amplificazione per emissione stimolata di onde elettromagnetiche.

I dispositivi in grado di produrre tale fenomeno prendono il nome di LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). In termini tecnici ciò che avviene è la produzione di un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata (luce laser).

Il rilievo di un oggetto architettonico utilizzando degli apparecchi topografici viene realizzato determinando le coordinate spaziali dei suoi punti caratteristici, scelti dall'operatore. Il laser scanner non effettua alcuna scelta tra la moltitudine dei punti rilevati, e i punti risultano distribuiti casualmente, seppur secondo una maglia regolare (Figure 2.1 e 2.2); il relativo svantaggio è che vengono acquisiti molti punti su superfici poco importanti (superfici lisce) e pochi punti su superfici utili ai fini di una restituzione (lungo le linee di discontinuità).

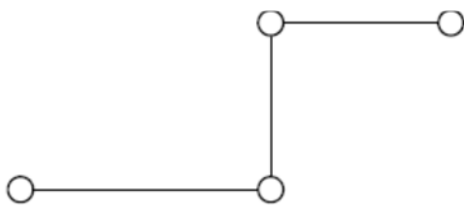


Figura 2.1: Rilievo umano (intelligente).

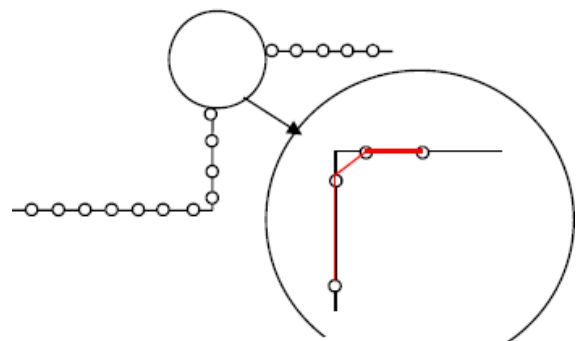


Figura 2.2: Rilievo LiDAR (abbondante).

Le tecnologie di laser scanner sono molteplici e permettono di rilevare oggetti piccolissimi ad elevatissima risoluzione e precisione, ma anche oggetti ampi a una più bassa risoluzione.

Il rilievo LiDAR deve essere pianificato per avere la massima precisione e completezza, spendendo le minori energie possibili e fornendo un prodotto finale che soddisfi il committente; se l'acquisizione avvenisse in maniera errata si potrebbe correre il rischio di dover ripetere le operazioni di rilievo, per questo motivo è importante decidere il tipo di strumento da utilizzare, studiare l'oggetto da rilevare e l'ambiente circostante prima di iniziare la campagna di acquisizione.

Accuratezza, scala grafica e livello di dettaglio delle elaborazioni grafiche sono concetti fortemente correlati; le tecniche e gli strumenti di misura devono essere individuati in modo da rispondere alle esigenze del caso.

L'utilizzo dei target (Figura 2.3) risponde all'esigenza di unire le scansioni tra di loro in un unico sistema di riferimento, sulla base di punti comuni visibili tra una scansione e l'altra, e di garantire il corretto allineamento delle scansioni grazie alla posizione dei punti misurati con una stazione totale (Figura 2.4).

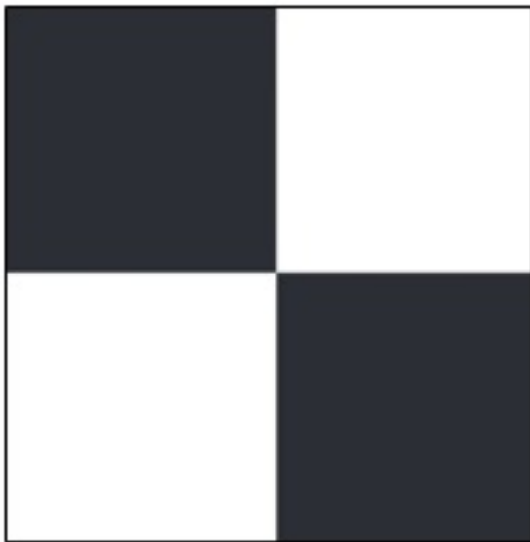


Figura 2.3: Esempio di target utilizzato per il rilievo.



Figura 2.4: Stazione Totale Leica TS2 Plus.

Se il controllo intelligente dell'acquisizione viene meno, occorre aumentare "l'intelligenza" nella progettazione e nel trattamento dei dati. È necessario pertanto tradurre in operazioni di intelligenza artificiale il complesso lavoro di interpretazione delle forme geometriche. Questo può essere fatto tramite due metodi:

- Riduttivo: Possibilità di ottenere più economicamente e rapidamente i prodotti tradizionali del rilievo.
- Propositivo: Opportunità di generare nuovi strumenti di rappresentazione e descrizione delle forme complesse.

In questa sfida sono coinvolti non solo i misuratori ma anche coloro che basano la propria attività sui risultati del rilievo metrico (Spanò & Chiabrando, 2016).



Figura 2.5: Esempio di risultato ottenuto dall'unione di scansioni laser (Spanò & Chiabrando, 2016).



Figura 2.6: Laser Scanner FARO Focus 3.

Diverse tecnologie per l'acquisizione di dati spaziali per la sicurezza nei cantieri sono state fin ora sviluppate, l'utilizzo di LiDAR è una delle più utilizzate. In questo sottocapitolo verranno riportati alcuni esempi, come l'utilizzo della tecnologia LiDAR per l'analisi dei cosiddetti "blind spots" (letteralmente punti ciechi), ossia quella porzione di campo visivo dell'operatore di una macchina pesante (Teizer, et al., 2010) o di una gru (Cheng & Teizer, 2014) ostruita dalla geometria del mezzo e dalla cabina dello stesso, l'identificazione di rischi negli scavi (Wang, et al., 2015), e il monitoraggio degli spostamenti di costruzioni adiacenti il cantiere (Dai, et al., 2014).

2.1.1 Laser scanner terrestre per la pianificazione della sicurezza negli scavi

Tra tutte le operazioni di costruzione, gli scavi sono forse una delle lavorazioni più pericolose, sia perché le condizioni del sito cambiano costantemente, spesso più volte al giorno, sia perché includono rischi come caduta dall'alto, caduta di materiali, allagamento improvviso, franamento delle pareti dello scavo, inciampo su attrezzature e materiali. I metodi attuali di progettazione e ispezione sui siti di scavo sono insufficienti, in quanto condotti manualmente, poco frequenti, onerosi in termini di tempo e soggetti a errori umani.

Una ricerca pubblicata nel 2015 (Wang, et al., 2015) presenta un nuovo metodo semi automatico per l'identificazione di rischi negli scavi e nelle altre operazioni geotecniche che richiedono accorgimenti preventivi aggiuntivi.

Un cantiere in cui erano in corso operazioni di scavo è stato selezionato come caso studio per condurre un esperimento. Il cantiere era approssimativamente lungo 120 m e largo 80 m, il punto più profondo dal piano stradale era di 12 m. Le operazioni di scavo erano quasi finite, e i parapetti anticaduta già applicati (Figura 2.7).



Figura 2.7: Pianta del cantiere oggetto dell'indagine e perimetro per la disposizione di dispositivi di protezione anticaduta (Wang, et al., 2015).

Quattro scansioni laser sono state effettuate per poter generare la nuvola di punti 3D dell'intero sito; queste nuvole di punti sono state successivamente migliorate, eliminando i disturbi causati da materiale e vegetazione (rumore) che in alcuni punti ostruivano la visuale. Questo processo dura pochi minuti per un operatore esperto utilizzando un software commerciale comunemente presente sul mercato, e prevede anche la rimozione di edifici adiacenti, oggetti irrilevanti, alberi e strade pubbliche, baraccamenti e mezzi pesanti. Le scansioni sono state successivamente unite per generare un unico file 3D contenente 7.771.131 punti (Figura 2.8).

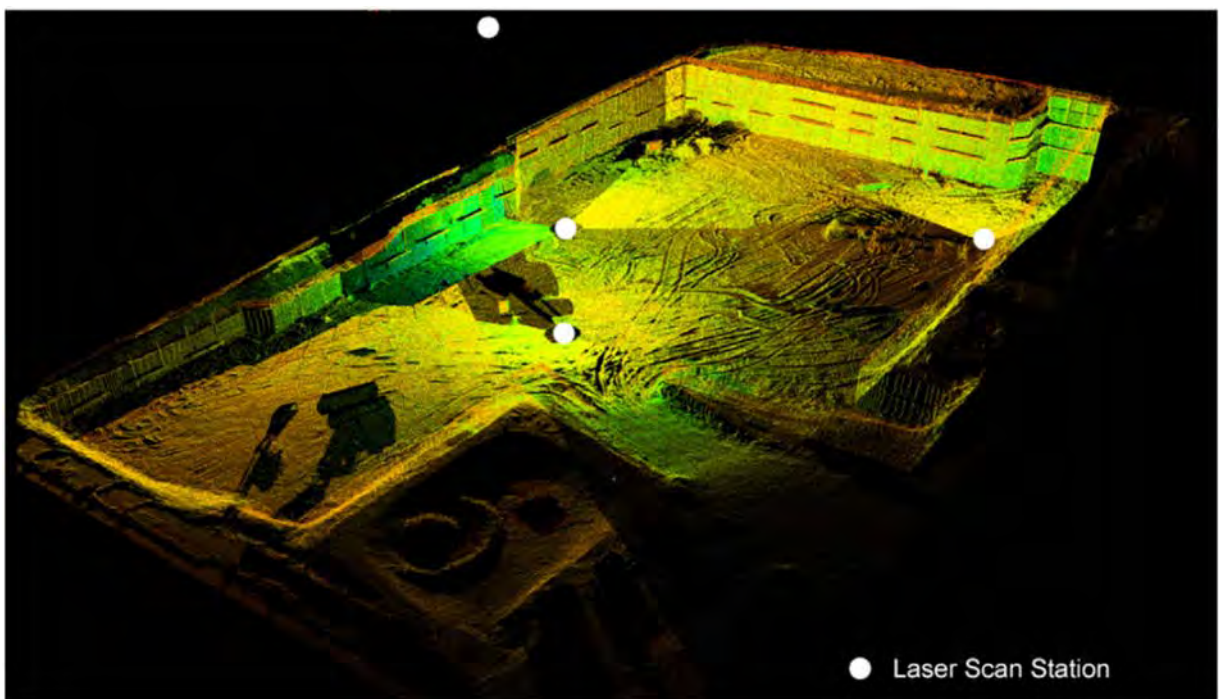


Figura 2.8: Vista isometrica del sito dopo la raccolta dei dati da laser scanner, i quattro cerchi bianchi in figura indicano le posizioni dei laser scanner per ogni scansione, i colori differenti indicano diversi livelli di riflettività, il verde indica alta riflettività e quindi minor errore (Wang, et al., 2015).

La posizione dei punti di stazionamento, così come l'altezza, sono stati scelti in modo da rilevare il maggior numero di superfici possibile. L'apparecchio, un laser scanner comunemente disponibile sul mercato, è stato utilizzato manualmente e alla fine del turno di lavoro. La nube di punti così pronta è stata esportata e salvata in un file con coordinate XYZ. È stata creata una griglia di occupazione contenente i dati in cubi (voxels), la dimensione di tali celle (0,3 x 0,3 x 0,3 m) è proporzionata alla dimensione del cantiere, per un totale di 4.444.000 celle, di cui solo 125.013 non vuote (solamente quest'ultime sono state utilizzate per l'esperimento).

Un software computazionale è stato utilizzato per calcolare, partendo dal fondo dello scavo, la densità delle colonne di celle non vuote (Figura 2.9) e analizzando la loro distribuzione è stato possibile identificare i punti che presentavano potenziali rischi di caduta o di crollo (Figura 2.10).

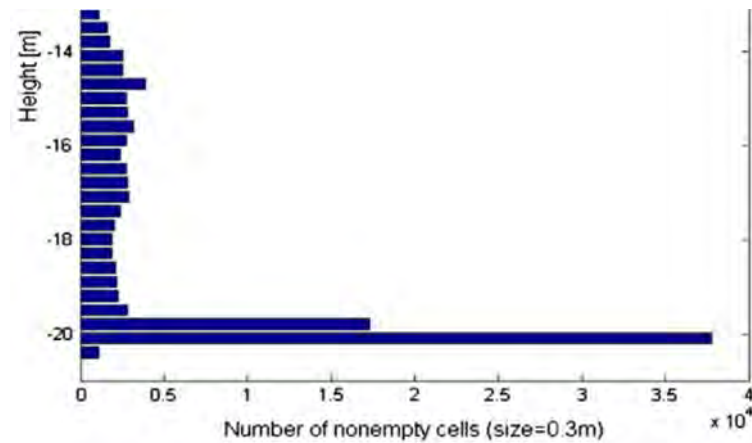


Figura 2.9: Distribuzione di celle non vuote in base all'altezza. Le colonne permettono di rilevare differenze di livello superiori al massimo consentito per normativa USA, e prevedere pertanto opportune recinzioni anticaduta (Wang, et al., 2015).

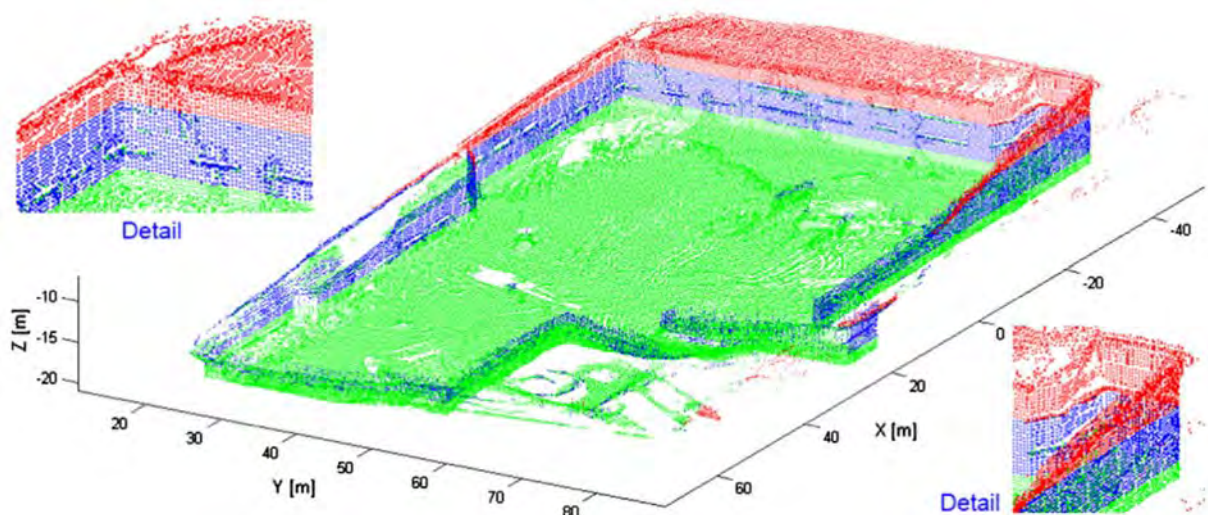


Figura 2.10: Mappa del pericolo di crollo e caduta. I punti verdi sono identificati come sicuri e non richiedono pertanto alcun dispositivo di sicurezza. I punti blu sono profondi da 1,52 a 6,10 metri, pertanto è necessario installare protezioni contro il crollo degli scavi e la caduta dei lavoratori. I punti rossi, superiori ai 6,10 m di dislivello, richiedono l'attenzione puntuale del safety manager nella progettazione dei dispositivi di protezione opportuni (Wang, et al., 2015).

Basandosi sul modello ottenuto, un software BIM (Tekla Structures) ha permesso la realizzazione automatica del progetto di armatura dello scavo (Figura 2.11). Il modello permette di calcolare l'esatto numero di elementi necessari, provvedendo a generare un automatico computo metrico. Questa tecnica potrebbe essere utilizzata in futuro per cantieri altamente ingegnerizzati, in contesti in cui è necessaria una precisione millimetrica a causa di un utilizzo di elementi prefabbricati, oppure per garantire una maggiore attenzione in contesti che prevedono la presenza di beni culturali da non danneggiare/proteggere durante i lavori. Questo tipo di impiego della tecnologia LiDAR può essere chiaramente reso più efficiente utilizzando una nuvola di punti generata da dati aerei ottenuti da drone (Wang, et al., 2015).

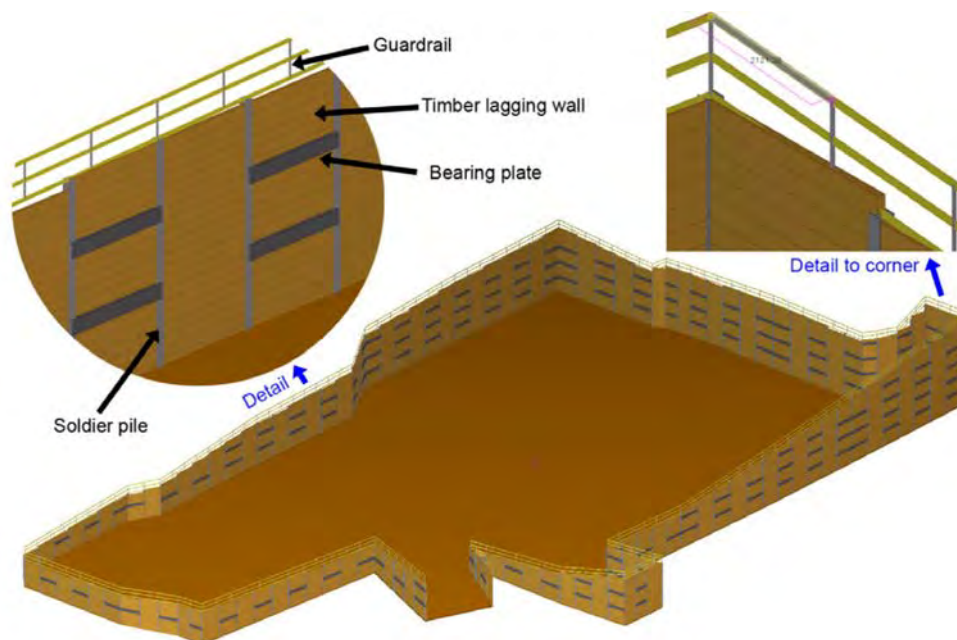


Figura 2.11: Modello di armatura dei fianchi dello scavo, integrato con parapetti di protezione da caduta e puntelli realizzato in ambiente BIM (Wang, et al., 2015).

2.1.2 Laser scanning per l'analisi dei punti ciechi dei mezzi di cantiere

Una delle più ricorrenti cause di incidenti occorsi tra macchinari pesanti e operai a terra (investimento) sono i cosiddetti blind spots (punti ciechi), ossia la parte del campo visuale dell'operatore parzialmente ristretta o totalmente ostruita dalla conformazione del mezzo e dalla cabina dello stesso. Spesso tali incidenti avvengono perché l'operatore (o un eventuale suo assistente a terra), non identificano correttamente altri oggetti o persone nel raggio d'azione di tali mezzi.

Esiste un metodo per illustrare il campo visuale di un mezzo; solitamente si utilizza un diagramma circolare al cui centro è posto il mezzo. Le aree scure indicano gli angoli morti, quelle gialle o tratteggiate indicano punti a visibilità ridotta osservabili tramite specchi retrovisori, il campo visuale libero è invece solitamente indicato in bianco (Figura 2.12).

I metodi attualmente utilizzati per la compilazione di tale diagramma sono:

- Il metodo previsto dalla norma ISO 5006 (Earth-moving machinery - Operator's field of view), il quale prevede il posizionamento di una o due fonti luminose all'interno della cabina, all'altezza degli occhi dell'operatore (Figura 2.13). La luce emessa a terra viene registrata manualmente e successivamente trasferita in una griglia al computer.
- Un altro metodo prevede che un operatore sieda all'interno della cabina, e utilizzando la stessa griglia del caso precedente, prenda nota di ciò che riesce a vedere.
- Mediante l'uso della realtà virtuale, utilizzando una scansione laser completa dell'esterno del veicolo.

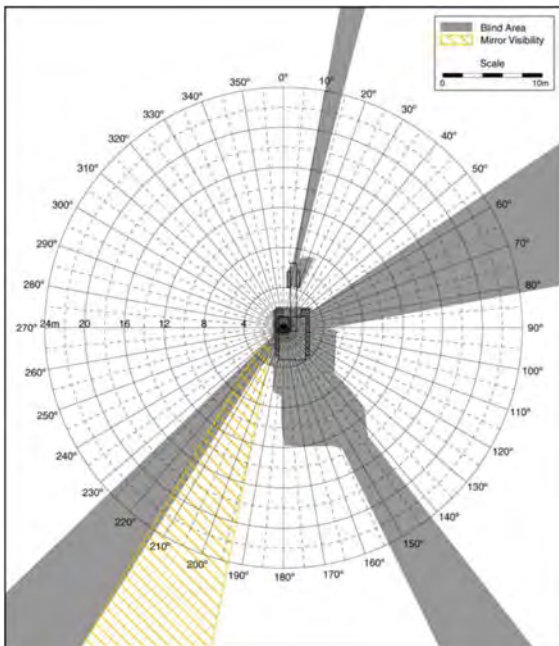


Figura 2.12: Diagramma del campo visuale di un escavatore idraulico Caterpillar 325B (Caterpillar Inc., 2004).



Figura 2.13: Dispositivo di supporto della luce per calcolo del campo visuale (Caterpillar Inc., 2004).

Attualmente esistono degli accorgimenti di sicurezza per diminuire i rischi generati dalla riduzione del campo visuale, utilizzando ad esempio specchi convessi in aggiunta ai normali specchi retrovisori, utilizzando telecamere a circuito chiuso a bordo del mezzo, o i più moderni sistemi anticollisione sviluppati dall'industria automobilistica (Teizer, et al., 2010).

Uno studio pubblicato dalla School of Civil and Environmental Engineering del Georgia Institute of Technology nel 2010 (Teizer, et al., 2010) illustra un metodo più accurato per l'analisi dei punti ciechi mediante l'utilizzo di un laser scanner (Leica ScanStation 2) posto all'interno della cabina (Figura 2.14). Dopo l'acquisizione è stata ottenuta una nuvola di circa 1,5 milioni di punti. Lo spazio attorno al mezzo è stato virtualmente suddiviso in una griglia 3D di 300 x 300 x 300 cubi, al fine di ridurre la potenza di calcolo necessaria ad analizzare il campo visuale.

Un algoritmo, sviluppato appositamente per gli scopi di questa ricerca, ha identificato quali cubi appartenessero al campo visuale e quali ai punti ciechi; in alcune situazioni la visibilità ridotta non avrebbe permesso di vedere completamente una persona, pertanto l'algoritmo sviluppato è stato in grado di analizzare la percentuale visibile delle dimensioni del corpo in un dato punto e raffinare di conseguenza la selezione. Sono quindi state definite aree in cui la vicinanza alla macchina erano più pericolose delle altre, restituendo una pianta (Figura 2.15) e una sezione (Figura 2.16) che analizzano la visibilità della sagoma di persona alta 1,8 m e larga 0,6 m alle distanze A di 2,5 m, B di 5 m, e C di 10 m.



Figura 2.14: Leica ScanStation 2 utilizzata all'interno della cabina di guida (Teizer, et al., 2010).

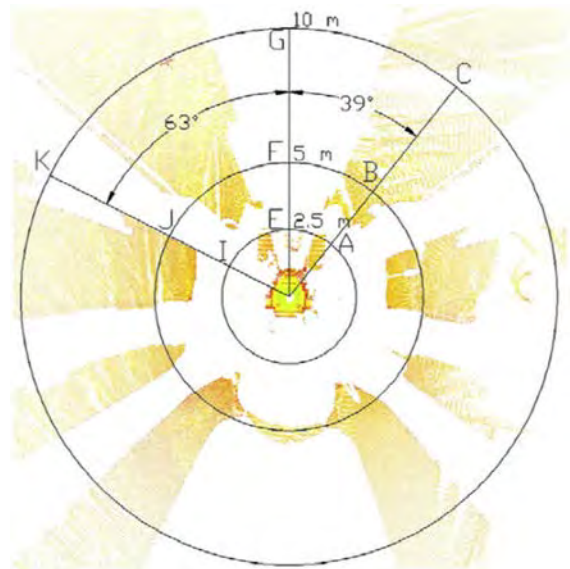


Figura 2.15: Nuvola di punti densificata del campo visuale di un bulldozer (Teizer, et al., 2010).

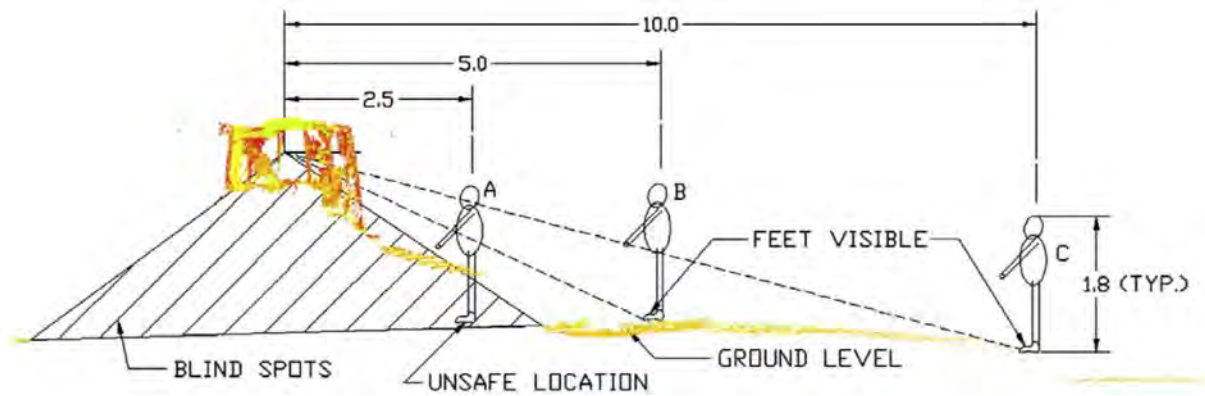


Figura 2.16: Visibilità di un lavoratore a diverse distanze dal mezzo (Teizer, et al., 2010).

Un altro importante mezzo, diventato ultimamente protagonista di sempre più frequenti incidenti, è la gru di cantiere. La scelta della posizione di tale mezzo non è condizionata infatti, in maniera prioritaria, dal parametro della visibilità. Le cabine delle gru sono situate ad elevata altezza; ciò produce agli occhi del gruista una visuale prevalentemente appiattita (2D) di ciò che avviene al piano stradale; questo è il motivo per cui spesso è necessario che qualcuno assista il gruista da terra. Essendo il cantiere un luogo molto congestionato, la restrizione del campo visuale diventa spesso limitante per le operazioni della gru, conducendo sovente a condizioni di scarsa sicurezza e alla diminuzione delle performance produttive.

Uno studio pubblicato dalla School of Civil and Environmental Engineering del Georgia Institute of Technology nel 2014 (Cheng & Teizer, 2014) affronta un metodo innovativo per l'analisi del capo visivo di una gru, utilizzata in un cantiere grande circa 100 x 40 m riguardante la costruzione di un edificio di un campus alto quattro piani fuori terra. Nel momento in cui l'esperimento ha avuto luogo, il secondo piano era in costruzione e la cabina della gru era situata a 46,5 m sul piano strada (Figura 2.17 e 2.18).

La nuvola di punti conteneva 2.027.763 elementi, suddivisi poi in 64.623 voxels di 0,2 x 0,2 x 0,2 m³ ciascuno. Gli oggetti sono stati suddivisi in quattro gruppi, in base all'altezza. I voxels sono stati così clusterizzati in base alla topologia e ai dati di elevazione; voxels con la stessa superficie normale e distanti l'uno dall'altro non più di 1 m sono stati inclusi nello stesso cluster. Sono stati così formati complessivamente un totale di 49 cluster.

È stato poi analizzato il campo visuale del gruista; gli elementi generanti una maggiore ostruzione sono risultati i pilastri, e i relativi blind spots sono stati marcati in rosso (Figura 2.19)

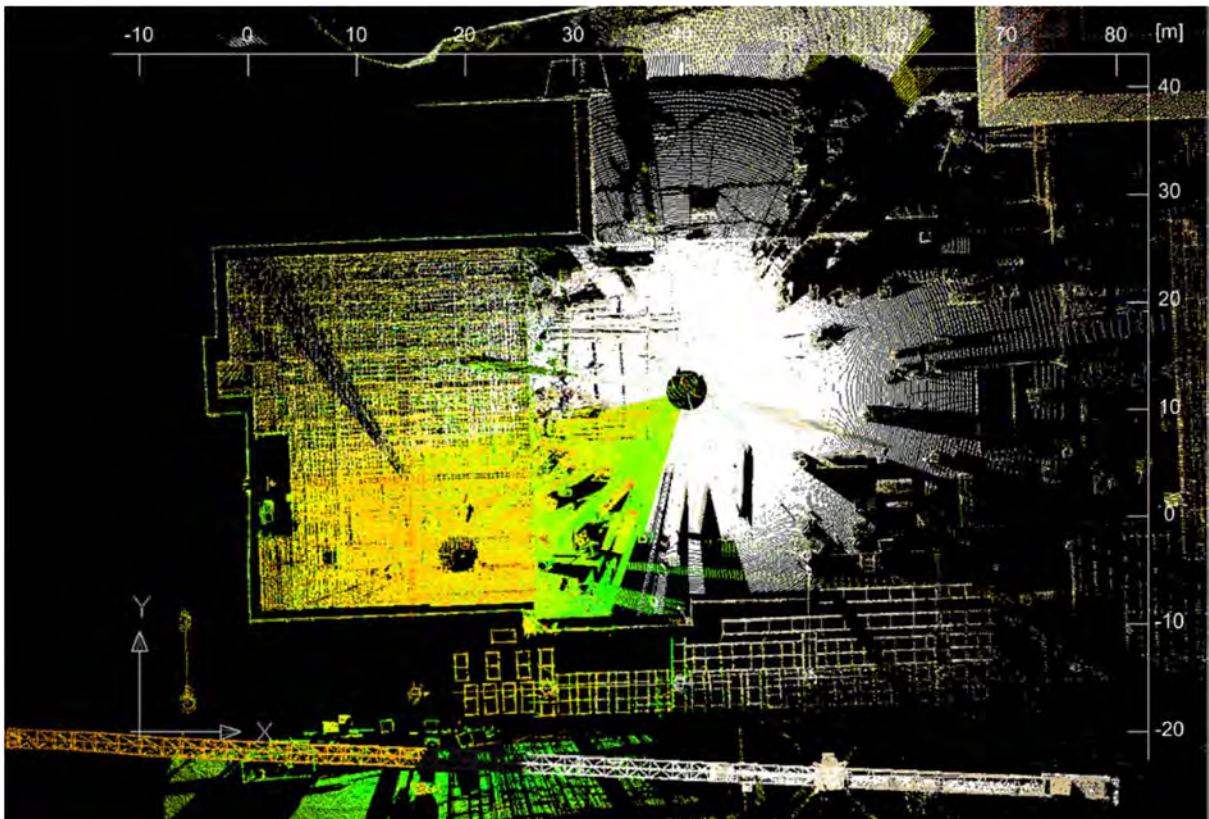


Figura 2.17: Vista planimetrica del secondo piano del cantiere oggetto dell'esperimento. I cerchi neri in figura rappresentano il posizionamento dei laser scanner, i colori differenti indicano diversi livelli di riflettività, il verde indica alta riflettività e quindi minor errore. Le aree nere non sono state misurate in quanto la vista risultava ostruita (Cheng & Teizer, 2014).

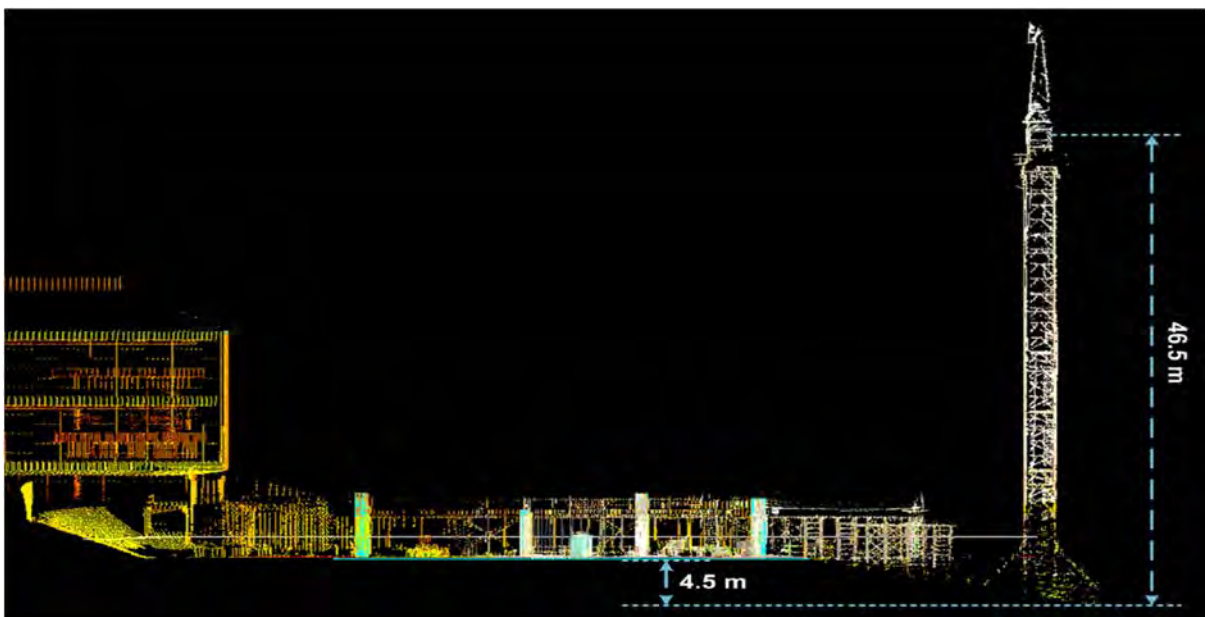


Figura 2.18: Prospetto del secondo piano del cantiere e della gru oggetto dell'esperimento (Cheng & Teizer, 2014).

I vertici di tutti gli oggetti più alti di 1,5 m sono stati analizzati per generare automaticamente una mappa isometrica (Figura 2.20). Sono state successivamente scelte manualmente sette posizioni alternative per la gru; muovendo la posizione della cabina, l'algoritmo ha calcolato di conseguenza la dimensione dei punti ciechi per ogni alternativa proposta, identificando in tutto 7 possibili alternative per il posizionamento della gru in funzione della riduzione del campo visivo del gruista.

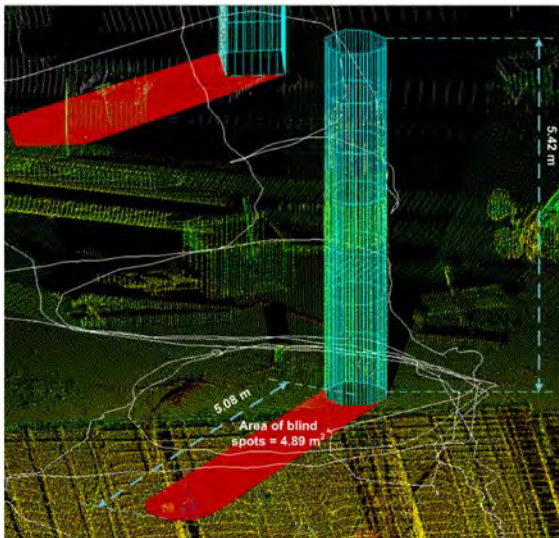


Figura 2.19: Rappresentazione geometrica del pilastro e della relativa area ostruita, ogni pilastro è alto 5,42 m e l'area ostruita è pari a 4,9 m² (Cheng & Teizer, 2014).

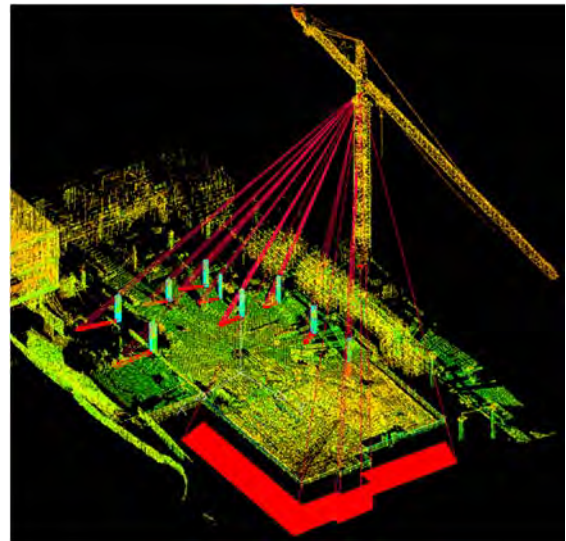


Figura 2.20: Mappa isometrica dei blind spots generati dai pilastri (Cheng & Teizer, 2014).

Un altro impiego degli strumenti avanzati del rilievo metrico nel monitoraggio delle condizioni di sicurezza di un cantiere è quello legato all'analisi delle deformazioni delle strutture permanenti (ad esempio edifici) e temporanee (ad esempio ponteggi) che sono soggette a sollecitazioni dinamiche durante i lavori. Un esempio è il monitoraggio degli edifici adiacenti ai cantieri in cui vengono condotte operazioni con macchine mobili per il movimento terra; per ragioni di sicurezza è molto importante che le strutture limitrofe vengano monitorate al fine di preservarne l'integrità durante le operazioni di scavo e di realizzazione delle fondazioni. I laser scanner e le stazioni totali si prestano bene a questi scopi e pertanto vengono utilizzati per misurare periodicamente gli spostamenti delle strutture, diversamente non apprezzabili con il rilievo manuale. Nei casi in cui il cantiere sia piccolo, e l'impiego di questa tecnologia non sia economicamente sostenibile, l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche digitali permette di ottenere risultati altrettanto veloci, accurati ed economici (Dai, et al., 2014).

2.2 Utilizzo del Sistema di Posizionamento Globale

Con l'acronimo di GPS (Global Positioning System) si fa riferimento a un sistema di posizionamento e navigazione satellitare civile che fornisce informazioni di geolocalizzazione a un dispositivo ricevitore GPS in qualsiasi condizione meteo, ovunque sulla superficie della terra o in prossimità di essa, a patto che sia possibile stabilire un contatto con almeno quattro satelliti appartenenti alla rete.

Il sistema GPS è basato su una costellazione di 24 satelliti che orbitano a circa 20.200 Km, opera indipendentemente da qualsiasi collegamento telefonico o accesso ad internet, anche se oggi queste tecnologie possono migliorare la fruizione di alcuni servizi basati sul GPS.

Inizialmente progettato come sistema militare dal Governo degli Stati Uniti d'America, oggi esso è accessibile a chiunque disponga di un ricevitore GPS, e fornisce informazioni di geolocalizzazione importanti anche per scopi civili e commerciali.

Con GPS si fa riferimento quindi non solo all'apparecchio ricevitore, o alla costellazione dei satelliti, ma a tutto il sistema, suddiviso a sua volta in tre sottosistemi differenti noti come segmenti; Il segmento spaziale, costituito oggi da 31 satelliti NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging), il segmento di controllo, cioè le stazioni a terra della NASA che possono controllare e manovrare i satelliti, Il segmento di utilizzo, cioè gli utenti civili e militari che hanno a disposizione uno o più ricevitori.

L'utenza ha quindi a disposizione uno strumento passivo, composto da un ricevitore e un antenna; la posizione che l'utente ricaverà in base alla ricezione, memorizzazione ed elaborazione dei segnali ricevuti sarà relativa al centro elettromagnetico, cioè al centro di fase dell'antenna.

Ogni 11 ore e 58 minuti, un satellite compie un'orbita completa, corrispondente a una velocità orbitale di circa 13.500 Km/h. Le orbite e il numero di satelliti presenti garantiscono in ogni momento e da qualsiasi punto della terra la visibilità di almeno quattro satelliti sopra i 5° dalla linea di orizzonte; con 24 satelliti funzionanti nell'emisfero Nord se ne vedono di regola dai 6 agli 8. La precisione delle operazioni di rilievo dipende direttamente dalla precisione dell'orologio a bordo del satellite.

Per poter conoscere la posizione del punto a terra è necessario conoscere la posizione di ogni satellite a cui ci si appoggia. È quindi necessaria una costante sorveglianza e correzione di ogni singolo satellite. Tale compito viene svolto dal segmento di controllo, composto da una stazione principale e cinque stazioni di monitoraggio.

Il principio di funzionamento del GPS si basa essenzialmente sulla misura della distanza tra osservatore e satelliti, la cui posizione nello spazio è nota con precisione. Ogni satellite emette i dati sulla sua posizione e sull'ora esatta al momento della trasmissione. Conoscendo la posizione del satellite e l'ora della trasmissione, la stazione ricevente potrà stabilire l'intervallo di tempo impiegato dall'onda radio per arrivare fino ad essa, e di conseguenza la distanza tra trasmittente e ricevente.

Per un rilevamento in tre dimensioni un solo satellite non è sufficiente, esso potrà infatti fornire solo le infinite possibili posizioni della ricevente, come il luogo dei punti appartenenti alla superficie di una sfera immaginaria, centrata sul satellite stesso. Se introduciamo la distanza calcolata da un secondo satellite, il luogo delle possibili posizioni della ricevente sarà la circonferenza formata dall'intersezione delle due sfere. La distanza misurata da un terzo satellite ridurrebbe l'incertezza a due punti dati dall'intersezione di questa circonferenza con una terza sfera. L'ultima piccola ambiguità rimasta potrebbe essere risolta grazie all'apporto di un quarto satellite, oppure più semplicemente scegliendo tra le due soluzioni, quella più plausibile (più prossima alla superficie terrestre). Ci troviamo, in altre parole, a risolvere quattro equazioni con quattro incognite spaziali X, Y, Z e una temporale T . Per calcolare pianoaltimetricamente la posizione di un punto sulla superficie del nostro pianeta saranno per questo necessari (come minimo) 4 satelliti (Figura 2.21).

Il sistema di riferimento adottato dal GPS è il WGS84; l'origine di tale sistema coincide con il baricentro della Terra, l'asse delle X è definito dall'intersezione del piano del meridiano di riferimento con il piano equatoriale, mentre l'asse Y giace sul piano equatoriale ed è perpendicolare all'asse X .

Il sistema GPS misura il tempo che le onde radio emesse dai satelliti impiegano per raggiungere il ricevitore; le onde radio viaggiano alla velocità della luce (300.000 Km/s), nota dunque la velocità e il momento dell'emissione e della ricezione dell'onda è possibile calcolare la distanza del ricevitore dal satellite. Il ricevitore è in grado inoltre di riconoscere da che satellite sta ricevendo il segnale, in quanto ogni satellite emette dei codici univoci.

Questo metodo può essere utilizzato a patto di disporre nel dispositivo ricevente di un orologio sincronizzato con quelli a bordo dei satelliti. Un orologio atomico con queste caratteristiche renderebbe un dispositivo ricevente molto costoso. Nel sistema GPS il ricevitore deve correlare l'istante di ricezione con quello di trasmissione prima di essere in grado di determinare l'intervallo di tempo trascorso e di conseguenza determinare la distanza; questo

problema viene risolto ricorrendo a una linea di posizione supplementare; la posizione così calcolata sarebbe quella reale in assenza di scarto da parte dell'orologio ricevente.

Per operazioni topografiche non viene valutata la posizione per punti singoli ma per coppie di punti, sui quali verranno posti due ricevitori (basi o baseline), questo tipo di misura viene detta GPS differenziale (Spanò & Chiabrando, 2016).

In questo capitolo sono illustrate alcune ricerche condotte sull'utilizzo della tecnologia GPS per finalità di safety management o di analisi relative alla gestione dello spazio di cantiere.

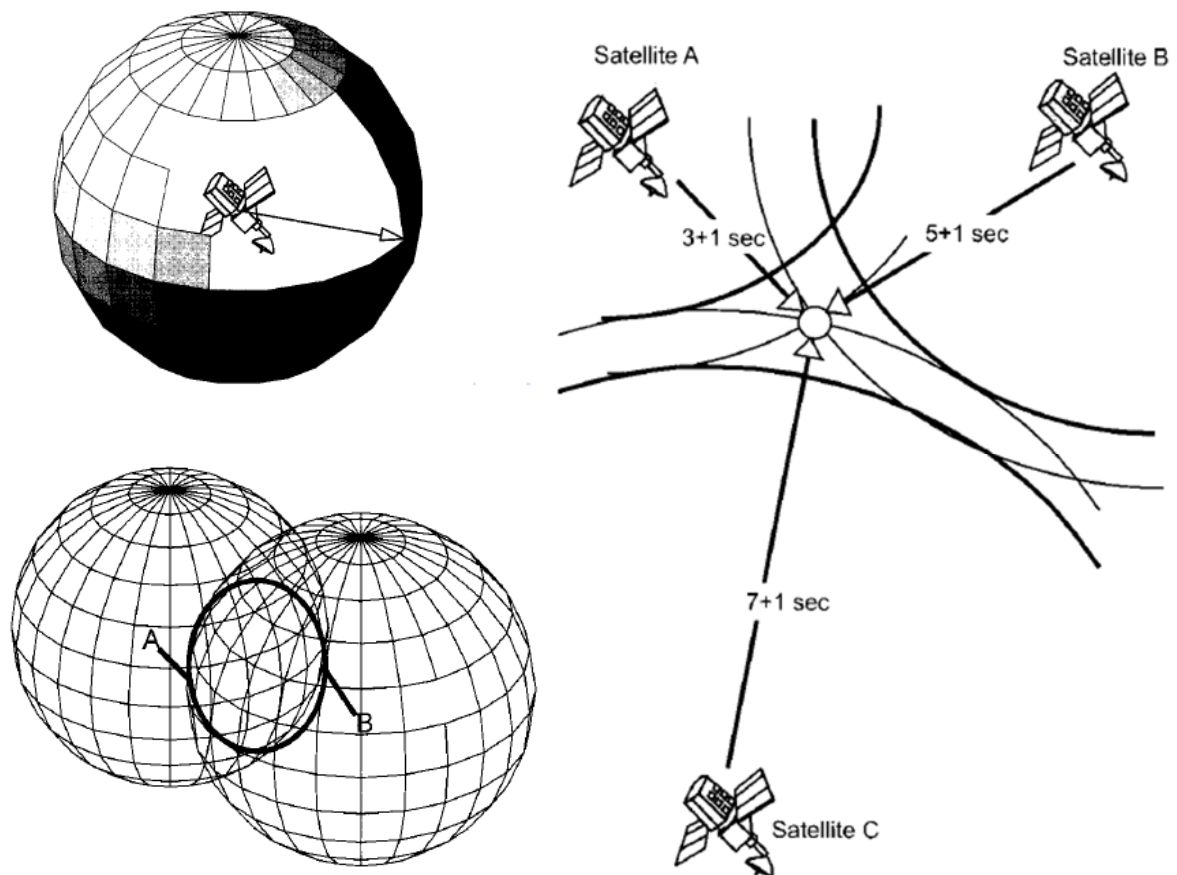


Figura 2.21: Gli schemi illustrano in che modo i satelliti GPS riescono ad identificare la posizione del dispositivo ricevente; un satellite identifica una sfera di punti avente per raggio la distanza misurata dal satellite alla ricevente, due satelliti identificano una circonferenza data dall'intersezione delle due sfere come la possibile posizione della ricevente, tre satelliti restringono le soluzioni a due punti nati dall'intersezione della precedente circonferenza con una terza sfera generata dal terzo satellite, il quarto satellite permette di identificare un unico punto (Spanò & Chiabrando, 2016).

2.2.1 Unità GPS implementate in elmetti protettivi e in macchine da cantiere

Uno studio svolto nel 2005 da parte del Systems Engineering and Automation department dell'Università Carlos III di Madrid (Abderrahim, et al., 2005) ha illustrato lo sviluppo di un sistema di sicurezza GPS integrato nell'elmetto protettivo degli operai edili. La posizione e il codice identificativo di ogni lavoratore può essere inviato tramite onde radio a una stazione di monitoraggio, dove avviene una comparazione con un database contenente tutte le mansioni a cui quel lavoratore è destinato e i vari compiti che deve eseguire in cantiere. In questo modo è possibile conoscere in tempo reale la posizione sia dei lavoratori che dei mezzi di cantiere, in guisa tale da rilevare e prevenire incidenti intervenendo con azioni tempestive (Figura 2.22).

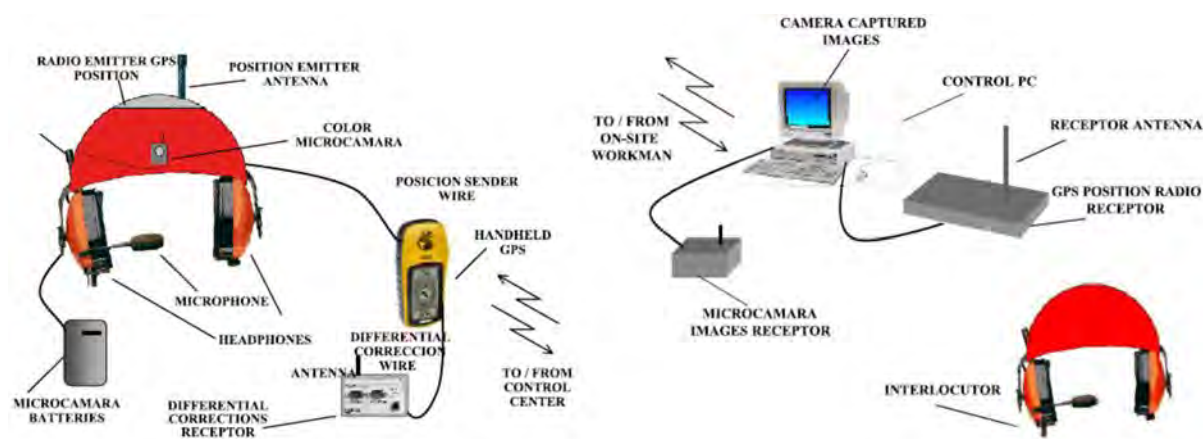


Figura 2.22: a) Schema di funzionamento dell'elmetto dotato di GPS e microcamera b) Diagramma delle interazioni tra dispositivo portatile e stazione di monitoraggio (Abderrahim, et al., 2005).

Si è già illustrato nel precedente capitolo come i rischi più comuni siano la caduta dall'alto e l'investimento, a seguito della continua interazione e compresenza tra le macchine e gli uomini presenti in cantiere. Per questo motivo un adeguato sistema di sicurezza deve lavorare su due livelli: un livello macchina e un livello uomo.

Il livello macchina si riferisce ai rischi per la sicurezza generati dalle macchine stesse; in questo caso la gru di cantiere viene identificata come la macchina più pericolosa, in quanto statisticamente è principale fonte di incidenti a livello mondiale. Il livello umano si riferisce alla salvaguardia degli operatori da possibili incidenti. In questo caso la strategia consiste nella definizione di *zone sicure* e *zone proibite* attorno agli operai e alle macchine in modo tale da poter generare un segnale d'allarme qualora queste zone collidano, causando potenziali situazioni di pericolo.

In questo modo viene definito un volume di pericolo virtuale attorno alla fonte di rischio (zona proibita) con una dimensione che dipende da parametri alcuni parametri, come ad esempio la velocità della macchina o la massa del carico che essa trasporta, e un volume virtuale attorno agli operai. A questo punto possono essere identificati due tipi di sicurezza:

- *Sicurezza passiva*: si riferisce a quelle situazioni in cui il lavoratore in pericolo viene avvertito in maniera automatica. Questo sistema di sicurezza si basa spesso su dispositivi radio con un determinato raggio di emissione; quando l'operatore entra in contatto con il volume definito "di pericolo" un'allarme viene attivato.
- *Sicurezza attiva*: si riferisce a quelle procedure che intervengono tramite una gestione da parte della stazione di monitoraggio; in questo caso viene ad esempio ridotta la velocità del macchinario o inibito il suo funzionamento quando il volume di sicurezza e il volume di pericolo collidono in maniera critica.

Nell'ultimo caso si ha un indubbio vantaggio dato dal fatto che gli operai possono comunque muoversi all'interno del volume di pericolo quando la fonte di rischio (macchinario) è spenta, attivando la segnalazione solo in caso di accensione della fonte di pericolo.

Un sistema simile può essere realizzato anche utilizzando stazioni radio a terra al posto del sistema GPS; il funzionamento è analogo, ma in questo caso la posizione non viene identificata dal satellite GPS ma tramite una triangolazione con le stazioni fisse. Questa variante permetterebbe l'utilizzo anche in ambienti chiusi, non coperti dal segnale dei satelliti GPS (Abderrahim, et al., 2005).

Un altro studio relativo ai nuovi approcci alla sicurezza che implicano analisi automatiche di dati georeferenziati raccolti in modo simile a quanto già visto è stato svolto nel 2012 in Atalanta presso la School of Civil and Environmental Engineering del Georgia Institute of Technology (Pradhananga & Teizer, 2012). Una serie di dati è stata raccolta utilizzando piccole unità GPS montate su elmetti e su macchine da cantiere.

I cantieri situati all'aperto ospitano solitamente risorse (equipaggiamento, lavoratori e materiali) in continua interazione tra di loro. Questa grande quantità di interazioni comporta interferenze che possono comportare rischi; I lavori in quota o vicino gli scavi espongono maggiormente i lavoratori a questi rischi potenziali.

Per questo studio sono stati utilizzati ricevitori GPS commerciali a basso costo, senza la necessità di installare ulteriori infrastrutture in cantiere. Prima di utilizzare questa tecnologia,

sono state eseguite delle analisi volte a valutare le prestazioni in differenti condizioni ambientali, basando la valutazione sulla precisione degli strumenti e sui loro errori.

La ricerca ha confermato che i dispositivi GPS utilizzati sono più performanti a cielo sereno, mentre le prestazioni diminuiscono in presenza di ostruzioni. Le deviazioni standard degli errori erano alte in tutti i casi, indicando che le letture possono variare significativamente. È chiaro che questo livello di errore può variare da dispositivo a dispositivo, e di volta in volta in base alle condizioni di esposizione.

Un caso studio, riguardante la movimentazione di terra per la realizzazione di una struttura sportiva coperta, è stato affrontato utilizzando 10 unità ricevitori GPS. Ogni unità è stata installata sull'elmetto dei lavoratori in modo da non interferire con le regolari attività; nel caso delle macchine da cantiere, l'unità è stata installata in modo da avere la più favorevole visione del cielo, e quindi dei satelliti. Alcuni dispositivi sono stati equipaggiati con due unità, al fine di avere una ridondanza funzionale alla relativa analisi degli errori (Figura 2.23). I dati sono stati raccolti per 12 ore al giorno circa.



Figura 2.23: Posizionamento delle unità GPS su a) elmetto b) macchine di cantiere c) posizionamenti ridondanti su mezzi pesanti (Pradhananga & Teizer, 2012).

Successivamente è stato sviluppato un tool di analisi in Visual C#2010. Sono state identificate le varie attività e le relative zone di lavorazione oltre al tempo speso in ogni attività; ciò ha permesso di determinare esattamente il tempo complessivamente impiegato da ogni operaio in un determinato luogo o per una determinata lavorazione.

La prossimità è un altro tipo di caratteristica che può essere indagata con queste analisi. La vicinanza dei lavoratori alle macchine può essere automaticamente rilevata, in modo da analizzare quante volte, per quanto tempo e con che distanza i lavoratori si sono avvicinati a macchine o ad attrezzature potenzialmente pericolose.

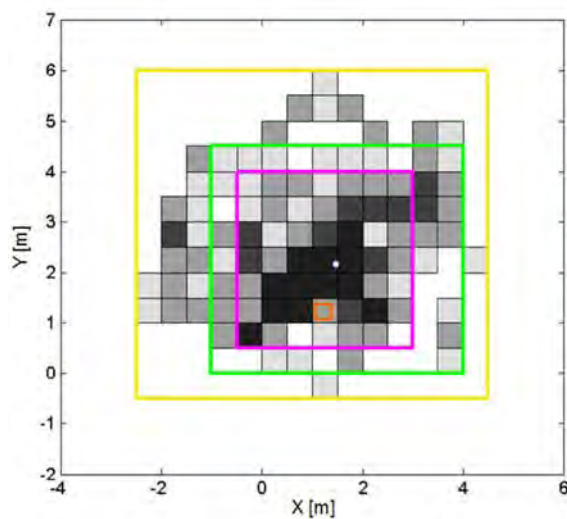
Tutti questi dati possono aiutare il safety planner a identificare quali lavoratori devono essere formati e informati su determinati rischi e pericoli, quali aree di cantiere devono essere oggetto di una valutazione dei rischi più approfondita, in che modo organizzare il layout di cantiere e il controllo del traffico veicolare e pedonale all'interno di esso (Pradhananga & Teizer, 2012).

2.2.2 Utilizzo di dati GPS per la generazione di griglie di occupazione

Un altro studio relativo all'utilizzo di ricevitori GPS integrati in dispositivi di protezione individuali è stato svolto nel 2015; in questo caso la visualizzazione dello spazio di lavoro è stata realizzata attraverso un applicativo BIM. Usando la modellazione del cantiere come parte integrante della pianificazione della sicurezza, sono stati elaborati degli algoritmi per estrarre parametri relativi alla localizzazione di attività e a lavorazioni specifiche inerenti la rimozione dei casseri di alcuni pilastri.

È evidente che raccogliere informazioni sulla posizione dei lavoratori può essere un indice (seppur approssimativo) dell'utilizzo dello spazio di lavoro impegnato per completare una determinata lavorazione. I dati raccolti possono generare parametri spaziali per ogni tipo di attività; un modello di griglia di occupazione è stato utilizzato per calcolare la frequenza del passaggio di un lavoratore su un cubo virtuale predefinito, che rappresenta una parte dello spazio lavorativo. Infine è stata calcolata in ambiente BIM la misura dello spazio di lavoro necessario per effettuare l'attività analizzata; questo permetterà in futuro di pianificare la stessa attività tenendo conto appunto di questo dato di sicurezza (know-how).

Un esperimento è stato condotto su un cantiere di piccole dimensioni, le attività analizzate facevano riferimento allo smontaggio dei casseri di 9 pilastri in cemento armato del secondo piano di un edificio. Due tag GPS sono stati installati in ognuno dei caschi dei due volontari, una videocamera è stata posizionata vicino alla struttura per aiutare l'analisi dei dati raccolti tramite GPS. In aggiunta, una scansione laser completa della struttura ha acquisito la forma geometrica dell'ambiente circostante, oltre ad essere stata usata per georiferire i dati GPS raccolti nella struttura. È stata applicata una griglia di occupazione per visualizzare differenti livelli di attività dei lavoratori; in base alle dimensioni del sito e all'accuratezza del GPS, la griglia è stata divisa in quadrati virtuali, ciascuno di $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ (Figura 2.24).



No. of Cube Visits	Greyscale
1	
2	
3 to 5	
6 to 8	
Pink	50% time spent
Green	75% time spent
Yellow	100% time spent
Orange	Column

Figura 2.24: Modello della griglia di occupazione. La scala di grigi indica il numero di accessi ad un dato cubo spaziale; i riquadri colorati determinano dei settori di cubi in base alla percentuale di tempo ivi trascorsa (Zhang, et al., 2015).

Oltre a queste considerazioni, è stato possibile condurre un'analisi visuale degli elementi in ambiente BIM. Come mostrato in figura 2.25, le colonne limitrofe limitano lo spazio disponibile alla squadra di carpentieri, costituendo di fatto ostacolo per la rimozione delle casseforme.

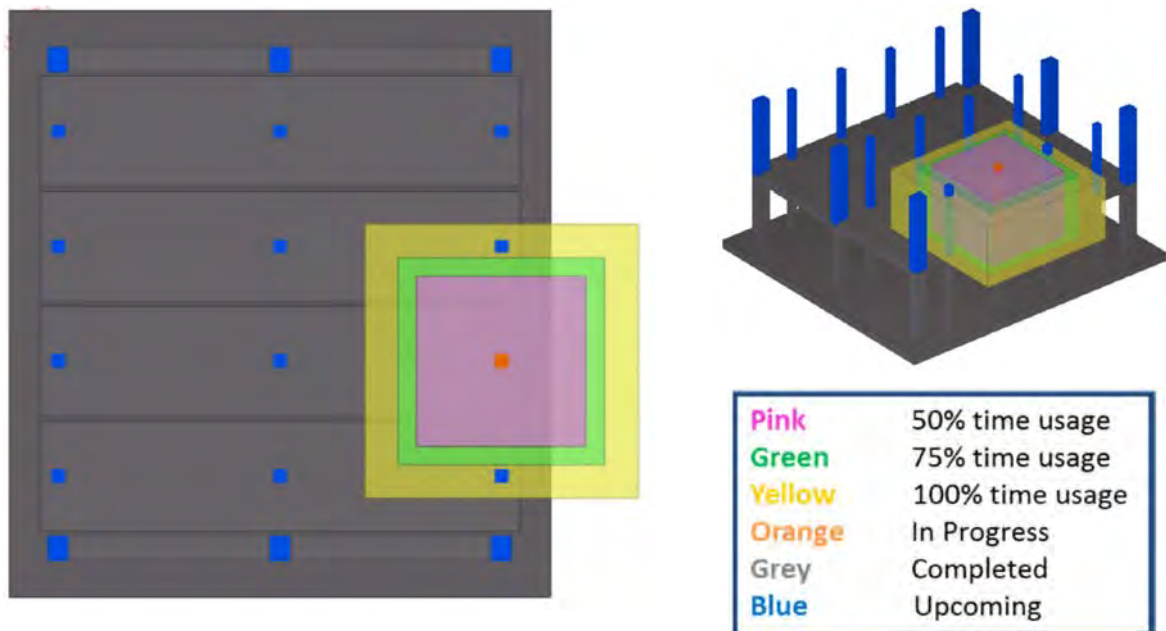


Figura 2.25: Visualizzazione in BIM dello spazio di lavoro necessario a rimuovere i casseri di un pilastro (Zhang, et al., 2015).

Il risultato finale indica che i safety planner dovrebbero prevedere un area libera da ostacoli di circa 3,5 m da ogni lato del pilastro. Questo spazio dovrebbe permettere ai lavoratori di lavorare in sicurezza; l'informazione raccolta può essere utilizzata dai carpentieri per preparare le condizioni del sito per il giorno successivo, e portare il safety manager a considerazioni riguardo la sequenza costruttiva da adottare a vantaggio di un miglioramento sulle condizioni di sicurezza delle squadre coinvolte (Zhang, et al., 2015).

2.3 Utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici

Con l'acronimo di GIS (Geographical Information System) si fa riferimento a banche dati a base cartografica, prodotte in larga misura avvalendosi dei dati acquisiti via satellite e via aerofotogrammetrica. "Si tratta di un sistema che integra informazioni geometriche e alfanumeriche diverse relative a un territorio (un luogo geografico o anche un ambito politico-amministrativo, per es. una Circonscrizione, un Comune, una Provincia, una Regione ecc.). In linea generale, a ciascuna minuta porzione di area, rappresentata sulla carta geografica e individuata mediante un sistema di coordinate, viene correlata, in un GIS, una serie di informazioni che, codificate in forma numerica e quindi grafica, possono essere aggiornate, visualizzate e stampate in tempi rapidissimi." (Treccani, 2012).

In termini più ampi, I sistemi informative geografici possono riferirsi a diversi processi, metodi e tecnologie, che trovano spazio in diversi campi di applicazioni, dall'architettura e l'ingegneria alle telecomunicazioni e alla logistica. Per questo motivo si può considerare come la base di molti servizi di geolocalizzazione, visualizzazione e analisi di dati.

Nel campo d'applicazione di questa tesi, il GIS trova un grande potenziale di espressione soprattutto nella fase della progettazione della sicurezza, fornendo una macro prospettiva su informazioni dettagliate riguardanti l'ambiente e il contesto.

Ci sono molti aspetti che possono essere controllati con il GIS, come ad esempio le valutazioni sul rischio rispetto agli allagamenti (poiché in tal caso tutte le misure di sicurezza precedentemente previste hanno bisogno di essere riprogettate), il piano di drenaggio del cantiere in caso di alluvione, il comfort termico del luogo di lavoro, la pianificazione del percorso veicolare, l'analisi del trasporto di materiale da costruzione da differenti accessi al cantiere, etc. Tutti questi aspetti devono essere considerati al fine della sicurezza; tenendo conto delle possibilità geospaziali si possono creare modelli organizzativi e di condivisione con i vari tecnici del processo progettuale. Le nuove costruzioni inoltre difficilmente sorgono isolate; l'ambiente circostante riveste un'importanza cruciale e può avere un impatto significativo sulla sicurezza dei lavoratori. Le ricerche dimostrano che la simulazione del processo costruttivo implementata dal cronoprogramma, dal modello 3D, dal modello topografico dell'area circostante e dall'analisi geospaziale, eseguita in un'unica piattaforma è oggi un requisito essenziale per l'industria edile. In questo caso il GIS facilita l'analisi geospaziale nella progettazione CAD 4D, sia per quanto riguarda la topografia del contesto che per quanto concerne la sequenza temporale delle lavorazioni (Bansal, 2011).

In questo capitolo sono illustrate alcune ricerche condotte sull'utilizzo del GIS per la mappatura dell'amianto antropico (ARPA Piemonte, 2016), la risoluzione di conflitti spaziali (Bansal, 2011), l'elaborazione del layout di cantiere (Cheng & O'Connor, 1996), la costruzione di strutture temporanee (Sebt, et al., 2008) e la pianificazione della sequenza esecutiva del progetto (Bansal, 2011).

Ulteriori ricerche riguardo le sperimentazioni GIS nel campo della pianificazione e della sicurezza non sono state trattate in questo capitolo, in quanto non riguardano l'applicazione specifica in cantieri edili. Vengono citati comunque per completezza: Jia et al. (2012) che hanno sviluppato un applicativo GIS per il monitoraggio della sicurezza nella costruzione di una stazione idroelettrica; Atay e Toz (2011) che hanno elaborato un sistema informatico di supporto decisionale per gestione della salute e della sicurezza proattiva nella costruzione di progetti lineari (oleodotti e gasdotti); Sebastian et al. (2013) che hanno approfondito studi di interoperabilità tra GIS e BIM tramite l'utilizzo di software open source (Bansal, 2016).

2.3.1 Geo database per la mappatura dell'amianto antropico

L'amianto, chiamato anche asbesto, è un minerale naturale a struttura microcristallina e di aspetto fibroso appartenente alla classe chimica dei silicati e alle serie mineralogiche dei serpentini e degli anfiboli. La Legge 257 del 1992 e successivamente il Decreto Ministeriale 101 del 2003 hanno messo al bando il suo utilizzo a causa della sua ormai accertata nocività per la salute.

La pericolosità dell'amianto è data dalla sua respirabilità e dalle sue dimensioni (dell'ordine di millesimi di millimetro). Macroscopicamente non è visibile; è sufficiente che una sola fibra entri nell'alveolo, e resti nel polmone, per determinare nell'arco di 20-40 anni il manifestarsi di malattie asbesto correlate (asbestosi, mesotelioma pleurico-peritoneale, cancro polmonare). Questa pericolosità è dettata non solo dalle dimensioni delle fibre, ma dal tempo di latenza delle patologie. Nel momento in cui la malattia si manifesta (con perdite di peso, perdite di fiato, stanchezza) si è già all'80% della sua evoluzione, che può determinare la morte imminente, o la sopravvivenza breve. L'amianto si suddivide in base alla configurazione geometrica microscopica in fillosilicati (serie del serpentino, figura 2.26) e inosilicati (serie degli anfiboli, figura 2.27).

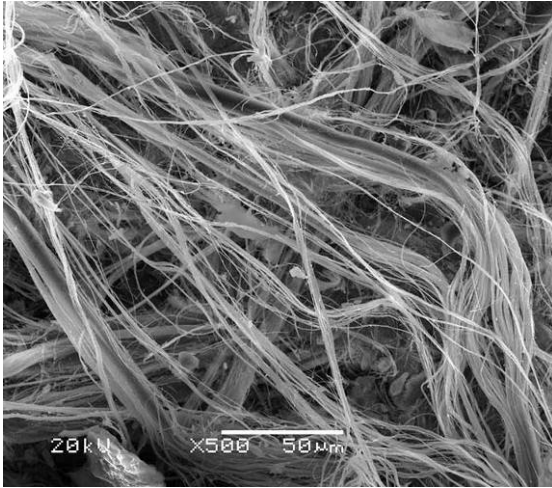


Figura 2.26: Scansione al microscopio elettronico di fibre di amianto della serie del serpentino (Fonte: www.greenreport.it/).



Figura 2.27: Scansione al microscopio elettronico di fibre di amianto della serie degli anfiboli (Fonte: www.saluteinternazionale.info/).

La normativa distingue due tipi di amianto, in base alla risposta alla sollecitazione del materiale; se il materiale può essere degradato con azione meccanica è considerato compatto. Quando invece non è necessaria una forza meccanica, ma esso può degradarsi spontaneamente, allora si chiama friabile.

Il Decreto 18 marzo 2003 n.101 del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio detta le regole per la realizzazione della mappatura completa delle zone del territorio nazionale interessate dalla presenza di amianto. In Piemonte le attività svolte e tutt'ora in corso riguardano due filoni principali:

- L'attività di mappatura dell'amianto naturale (svolta tra il 2004 e il 2006) attualmente in fase di revisione e aggiornamento.
- La mappatura dell'amianto antropico (avviata nel 2013) tutt'ora in corso.

Il progetto di mappatura antropica regionale è realizzato da Arpa Piemonte e Regione Piemonte. Attraverso l'applicativo online di ARPA Piemonte è possibile consultare la mappatura dell'amianto antropico (prevalentemente coperture in fibrocemento, figura 2.28).

La mappatura amianto antropico è stata basata sull'uso combinato delle bande del visibile e del vicino infrarosso delle ortofoto prodotte dalla Regione Piemonte con voli del 2009 e 2010.

“Dopo una prima fase di trattamento delle ortofoto la metodologia prevede l'utilizzo di modelli di segmentazione object oriented e la ricerca di chiavi di interpretazione e campioni di

coperture di cemento amianto significativi. La successiva fase di classificazione identifica le coperture con caratteristiche assimilabili al cemento amianto escludendo aree vegetate, corpi idrici e altre tipologie di oggetti e coperture del suolo non rilevanti.” (ARPA Piemonte, 2016).

Completata la fase di analisi delle immagini, segue l’attività di post-elaborazione dei risultati in ambiente GIS (Geographical Information System). I risultati della classificazione sono attribuiti ai singoli edifici derivanti dalla cartografia tecnica regionale. Con operazioni di reverse geocoding vengono assegnati gli indirizzi degli edifici individuati. Queste procedure permettono di ottenere un risultato facilmente utilizzabile dai rilevatori nelle successive fasi di sopralluogo. I risultati confluiscono in un geo database per essere ulteriormente analizzati e verificati attraverso sopralluoghi a campione e fotointerpretazione tramite servizi con riprese aeree panoramiche (es. Street View, Bing Maps, Istella).

Alla fase di mappatura speditiva sono seguiti i sopralluoghi in campo, realizzati dal personale dei Dipartimenti Provinciali di ARPA. Durante il sopralluogo sono state analizzate le dimensioni, la natura delle coperture ed il loro stato di conservazione. È stata predisposta una scheda apposita per descrivere la situazione riscontrata. Contemporaneamente sono stati valutati gli aspetti connessi alla pericolosità per l’ambiente e la salute pubblica. La verifica in campo è stata supportata da un’applicazione WebGIS che ha permesso ai rilevatori di aggiornare in tempo reale i dati inerenti le fasi del sopralluogo.

In questo modo è stato possibile comporre progressivamente una banca dati unica e omogenea su scala regionale, ed avere un quadro costantemente aggiornato degli esiti del censimento e dello stato di avanzamento dei lavori (ARPA Piemonte, 2016).



Figura 2.28: esempi di dati acquisiti tramite drone (modelli di nuvole di punti) per il rilievo di amianto in Piemonte (ARPA Piemonte, 2016).

2.3.2 Utilizzo del GIS per l'identificazione e la risoluzione dei conflitti spaziali

Per quanto riguarda la tematica dello space management, gli applicativi GIS permettono di classificare non solo le lavorazioni interferenti (che avvengono nello stesso spazio) ma anche quelle contemporanee (che avvengono nello stesso arco temporale); a tal proposito delle regole di vincolo possono essere create tra specifiche attività, affinché si possa intervenire preventivamente qualora le stesse siano incompatibili tra loro (Bansal, 2011).

Le topologie analizzano, comunicano e riparano l'integrità spaziale del progetto; quando una regola topologica è violata, il luogo del progetto in cui si verifica l'errore viene identificato in attesa della correzione da parte del progettista (Figure 2.29 e 2.30).

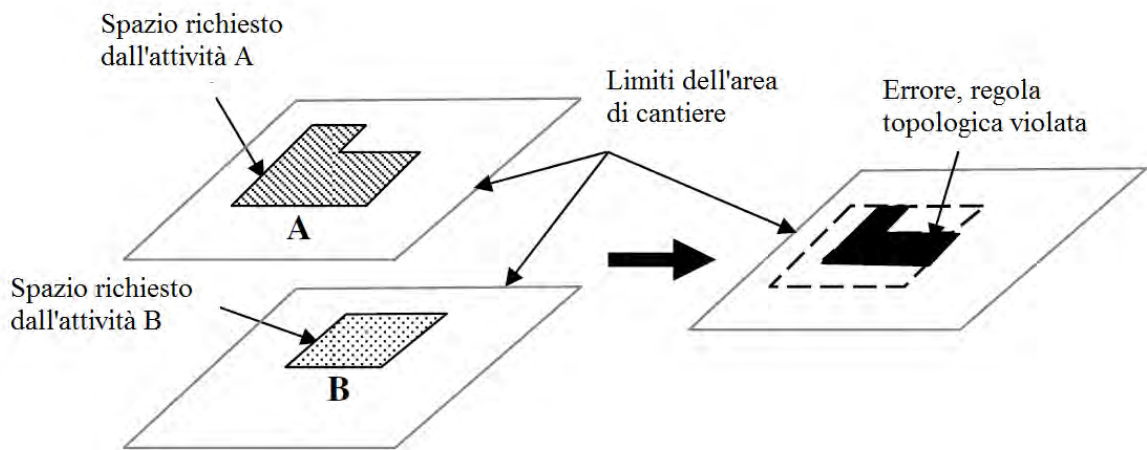


Figura 2.29: Regola “Non deve sovrapporsi con” applicata a due aree, la topologia segnala il punto in cui la regola è violata sotto forma di un errore (Bansal, 2011).

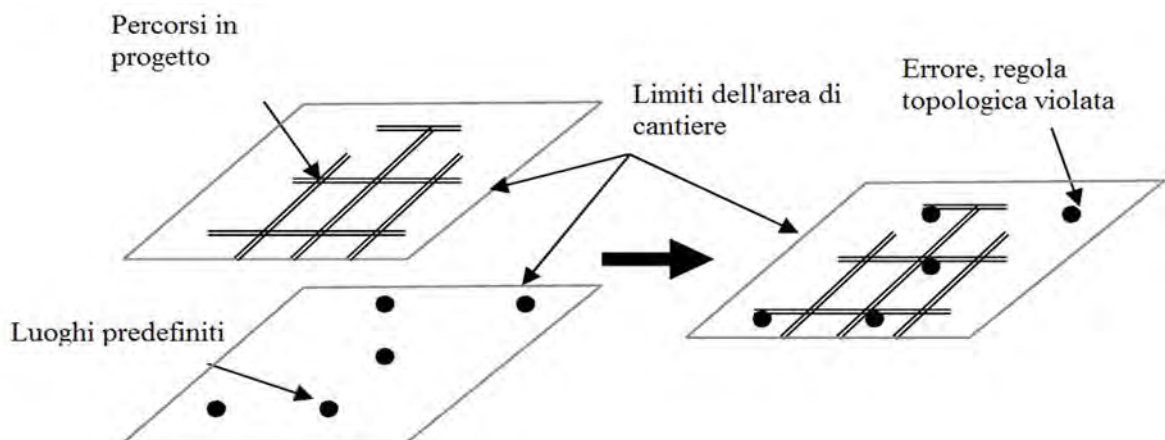


Figura 2.30: Regola “Deve essere coperto da linee (percorsi)” applicata a due livelli; la topologia segnala l'elemento in cui la regola è violata sotto forma di un errore (Bansal, 2011).

2.3.3 Utilizzo del GIS per la generazione del layout di cantiere

Nell'ambito di una ricerca degli anni '90 (Cheng & O'Connor, 1996) è stato sviluppato uno studio riguardante l'automazione e il supporto alla definizione del layout di cantiere, soprattutto per quanto concerne la localizzazione di strutture temporanee e baraccamenti, attraverso un sistema che includeva un applicativo GIS con un database di management integrato.

I baraccamenti sono delle strutture temporanee situate nel cantiere a supporto delle operazioni di costruzioni (servizi logistici), possono essere uffici, officine, laboratori, etc. e la loro posizione incide sull'organizzazione del lavoro, soprattutto per quanto riguarda l'interferenza e la distanza negli spostamenti di lavoratori e materiali. In questo caso il GIS ha lo scopo di progettare i servizi logistici posizionandoli il più vicino possibile alle relative attività supportate (Figura 2.31).

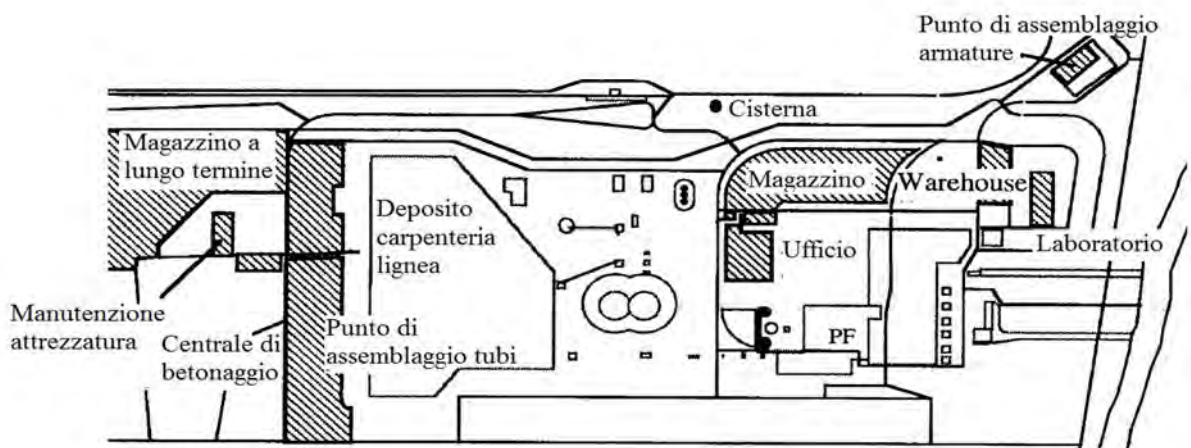


Figura 2.31: Layout dei servizi logistici di cantiere (Cheng & O'Connor, 1996).

Il funzionamento è basato sul calcolo computazionale di informazioni, intese come relazioni in termini qualitativi e quantitativi, tra i servizi logistici da collocare. In questo caso il sistema compie una serie di operazioni spaziali sul database per identificare il miglior layout; queste operazioni sarebbero difficili e ripetitive da compiere manualmente. Il sistema permette di collocare fino a un massimo di 25 servizi logistici, non permette l'analisi spaziale in tre dimensioni e non tiene conto del collocamento di mezzi da costruzione.

Seguendo lo stesso filone di questa ricerca, sono state analizzate le relazioni ideali tra i diversi servizi logistici, basandosi sulle raccomandazioni OSHA (Occupational Safety and Health Administration) numero 1926.407 (Tabella 2.1). Molto spesso soddisfare una relazione ne

invalida un'altra, pertanto il safety manager deve stabilire delle priorità nella scelta del layout finale (Sebt, et al., 2008).

Tabella 2.1: Relazione tra i servizi (Sebt, et al., 2008).

Servizio logistico	Relazione	Servizio o area connessa	Servizio logistico	Relazione	Servizio o area connessa
Alloggi	Lontani da	Area lavorazioni	Magazzino	Vicino a	Entrata cantiere
	Lontani da	Raggio gru		Vicino a	Entrata veicoli
	Vicini a	Entrata cantiere		Visibile da	Uffici
		Accanto a		Garage	
Servizi igienici	Distanza definita dal progettista	Area lavorazioni Uffici Alloggi	Garage	Distanza definita dal progettista	Entrata veicoli Uffici
Mensa	Lontana da Vicina a	Area lavorazioni Servizi igienici	Reparto saldatura	Accanto a Lontano da Lontano da	Reparto idraulico Uffici Deposito casseri
Parcheggio	Accanto a	Uffici	Reparto idraulico	Vicino a	Reparto saldatura
	Vicino a Lontano da	Entrata veicoli Area lavorazioni		Lontano da	Uffici
Uffici	Accanto a	Entrata cantiere	Reparto elettrico	Vicino a	Reparto idraulico
	Vicino a	Entrata veicoli		Lontano da	Uffici
	Lontano da	Rep. saldatura			
	Lontano da Lontano da	Reparto elettrico Strada d'accesso			
Laboratorio test campioni	Vicino a	Garage	Deposito casseri	Vicino a	Strada d'accesso
	Vicino a	Reparto elettrico			
Deposito carburante	Lontano da	Rep. saldatura	Area deposito Acciaio Elettrico	Accanto a	Reparto saldatura
	Vicino a	Garage		Accanto a	Reparto elettrico

In questa ricerca sono stati approfonditi anche aspetti legati alla localizzazione della gru. La gru è la macchina di cantiere più costosa, e spesso la più condivisa. Un uso efficiente di questa risorsa influenza direttamente aspetti di sicurezza, in quanto dovrebbe essere situata in condizioni tali da evitare interferenze e collisioni. Spazi di lavoro ristretti e limitazioni delle capacità della gru rendono comunque inevitabile che l'area di lavorazioni si sovrapponga, e le interferenze possono verificarsi, anche se diverse gru lavorano a livelli differenti (Figura 2.32).

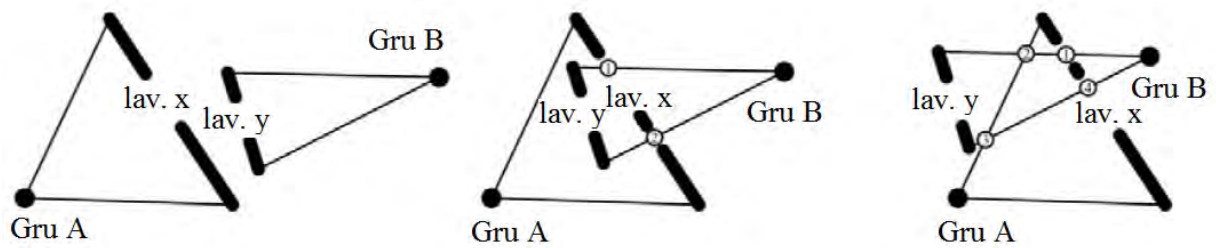


Figura 2.32: La gravità delle interferenze può essere quantificata in base al numero di punti di intersezione generati da triangoli aventi per vertice la gru, e per lato opposto il segmento determinato dallo spostamento del carico (Sebt, et al., 2008).

2.3.4 Applicazioni GIS per la pianificazione della sequenza di esecuzione del progetto

Lo studio in esame (Bansal, 2011) utilizza un'animazione GIS 3D per la comprensione della sequenza costruttiva, permettendo al progettista di prevedere in anticipo attività che possano avere un alto potenziale di rischio e pericolo.

L'approccio GIS permette al safety planner di manipolare il cronoprogramma, le lavorazioni e la sequenza in un unico applicativo; ciò facilita la rapida generazione di una sequenza esecutiva sicura e favorisce l'interazione e la collaborazione tra i vari progettisti. ArcGIS fornisce un modulo integrato che permette di "volare" attraverso l'animazione per mostrare le condizioni del cantiere e dell'intorno.

Durante il processo di revisione, se il cronoprogramma pianificato evidenzia situazioni pericolose, lo stesso può essere corretto tramite GIS prima della sua attuazione. La modellazione 4D, insieme alle condizioni topografiche e il database sulla sicurezza, aiutano il safety planner a definire le soluzioni migliori, indicando anche dove, quando e perchè applicarle.

Durante la ricerca condotta da Bansal, l'uso del GIS vuole rispondere a quattro domande (Cosa? Quando? Dove? Perché?) ed il lavoro è stato sviluppato in tre fasi:

- 1) Sviluppo di un database sulla sicurezza che includesse informazioni relative alle diverse lavorazioni; il database è stato utilizzato per determinare quali tipi di misure di sicurezza fossero attuabili.
- 2) Redazione di una sequenza costruttiva che favorisse l'identificazione di situazioni pericolose per determinare quando e dove le misure di sicurezza fossero state necessarie.
- 3) Gestione, richiamo e analisi delle informazioni sulla sicurezza (spaziali e non), generando e mantenendo collegamenti al modello 3D, alla collocazione geografica e alla condizione topologica per rispondere al perché utilizzare una determinata soluzione.

Il database grafico-spaziale ha il compito di mantenere informazioni come disegni e layouts (il GIS lavora sia in formato vettoriale che raster); le informazioni non grafiche riguardante la sicurezza sono invece collocate in un database non spaziale. Inizialmente le documentazioni sulla sicurezza sono state compilate utilizzando i suggerimenti del Bureau of Indian Standard, ed il database è stato successivamente esteso con informazioni tecnico pratiche sulla sicurezza da parte di esperti sul campo. Per decidere il livello di rischio, il database è stato anche popolato

con dati riguardanti i metodi di costruzione, le condizioni durante diversi periodi dell'anno e così via. Il sistema è aggiornabile ed espandibile ed è collegato ai codici regolatori (normativa).

La figura 2.33 illustra il processo iterativo di definizione della sequenza esecutiva "sicura".

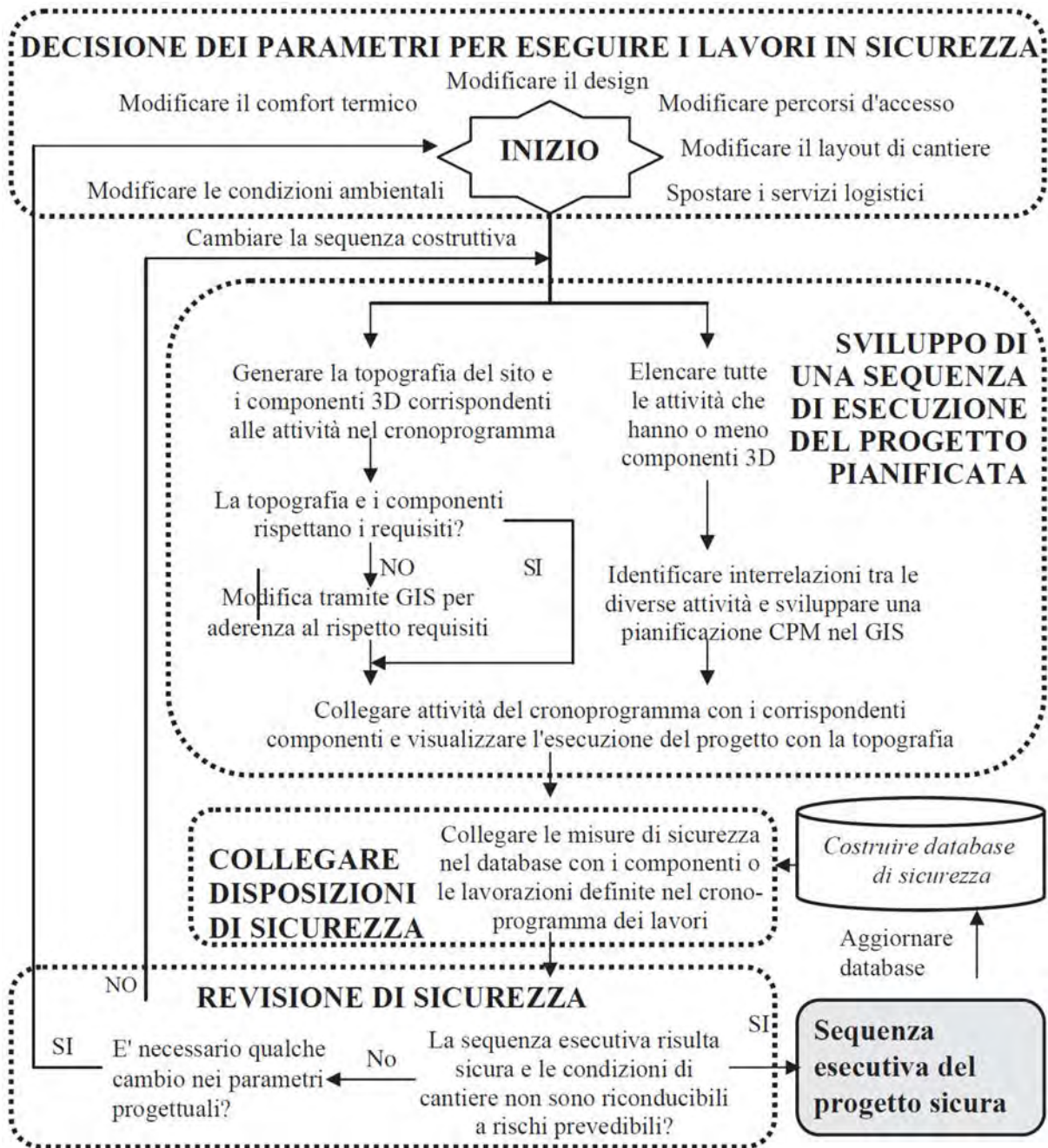


Figura 2.33 Processo di pianificazione di una sicura sequenza esecutiva del progetto e revisione del cronoprogramma per la sicurezza in ambiente GIS (Bansal, 2011).

Le fasi in dettaglio possono essere descritte come di seguito:

- 1) Decisione dei parametri per eseguire i lavori in sicurezza: Consiste nel decidere tra diversi fattori che influenzano la sicurezza dei lavoratori; a tal proposito il design e il layout di cantiere sono fattori dominanti. Questo argomento è stato precedentemente approfondito nella già citata ricerca di Cheng & O'Connor (1996).
- 2) Sviluppo di una sequenza pianificata di esecuzione del progetto: Il progetto viene scomposto nelle lavorazioni, nelle interazioni e nelle durate stimate per sviluppare il cronoprogramma. Il modello 3D in GIS viene elaborato in due parti: la parte dell'edificio e la parte dell'intorno. Per generare una sequenza, i componenti 3D sono collegati con il cronoprogramma; dopo l'associazione di ogni attività con la sua controparte 3D, il risultato 4D viene rivisto per i controlli di sicurezza.
- 3) Collegamento delle disposizioni di sicurezza: È importante tenere conto di questo passo fin dal principio; lo scopo è quello di assicurare l'aderenza con le normative in materia di salute e sicurezza e di conseguenza decidere i metodi più sicuri per l'esecuzione.
- 4) Revisione di sicurezza: In questo processo viene analizzata la sequenza costruttiva dal safety manager; se qualcosa non appare sicura, il processo viene indagato al fine di trovare una sequenza alternativa o di cambiare i metodi costruttivi. Si tratta di un processo iterativo che ha termine solamente quando il safety manager è soddisfatto.
- 5) Aggiornamento del database di sicurezza: spesso è impossibile ridurre al minimo o eliminare alcuni rischi; in questo caso i rischi che vengono "accettati" dal safety manager devono essere attenzionati successivamente, in corso d'opera, da chi coordinerà l'esecuzione. Queste informazioni vengono quindi caricate sul database di sicurezza.

2.4 Utilizzo del Building Information Modeling

Il crescente utilizzo della tecnologia BIM in architettura, ed in senso più ampio nell'industria delle costruzioni, sta cambiando il modo in cui la sicurezza può essere affrontata. In questo scenario il BIM trova applicazione per migliorare le fasi di pianificazione, gestione e comunicazione, integrando in maniera più stretta la sicurezza con il processo progettuale nel suo insieme.

I vantaggi nell'utilizzare un ambiente di progettazione parametrico risiedono in alcune differenze sostanziali con le consolidate prassi di progettazione CAD (Disegno Tecnico Assistito, in inglese Computer Aided Design); la creazione di un unico modello in cui possono collaborare i diversi responsabili del progetto (Figura 2.34), l'interoperabilità con altri software (ad esempio di analisi energetica e strutturale) attraverso l'utilizzo di plug-in sono alcune delle caratteristiche alla base dell'affermazione della modellazione digitale parametrica negli ultimi anni.

Nonostante la pianificazione della sicurezza del cantiere sia una parte fondamentale del processo di produzione edilizio, è tutt'ora spesso eseguita in maniera separata dalle altre fasi progettuali, e solamente su supporto cartaceo. La pianificazione della sicurezza in 4D fornisce il vantaggio di verificare in maniera dettagliata il progetto durante le diverse fasi, promuovendo una pianificazione attenta in favore del miglioramento della sicurezza generale del sito (Sulankivi). Il BIM fornisce modelli dinamici che si evolvono di pari passo alla realizzazione dell'opera e permettono una più facile interazione tra le figure coinvolte nel progetto, come ad esempio progettisti, contractors, specialisti della sicurezza etc (Zhou, et al., 2012).

La combinazione di nuvole di punti acquisite tramite tecniche di rilievo e la successiva implementazione in un sistema BIM può fornire un supporto nelle diverse fasi realizzative di una costruzione; in particolare la combinazione di queste due tecnologie ha implicazioni importanti nell'analisi e nella comparazione di informazioni sull'as-planned e sull'as-built di un progetto, mediante l'utilizzo di algoritmi di change detection.

Il tipo di strumento da utilizzare è da scegliere in base all'utilizzo che si vuole fare del dato acquisito, e alla precisione che si vuole ottenere. Oltre all'acquisizione tramite laser scanner (aereo o terrestre) possono essere utilizzati ulteriori metodi di acquisizione dati, ad esempio fotogrammetria terrestre o aerea da drone.

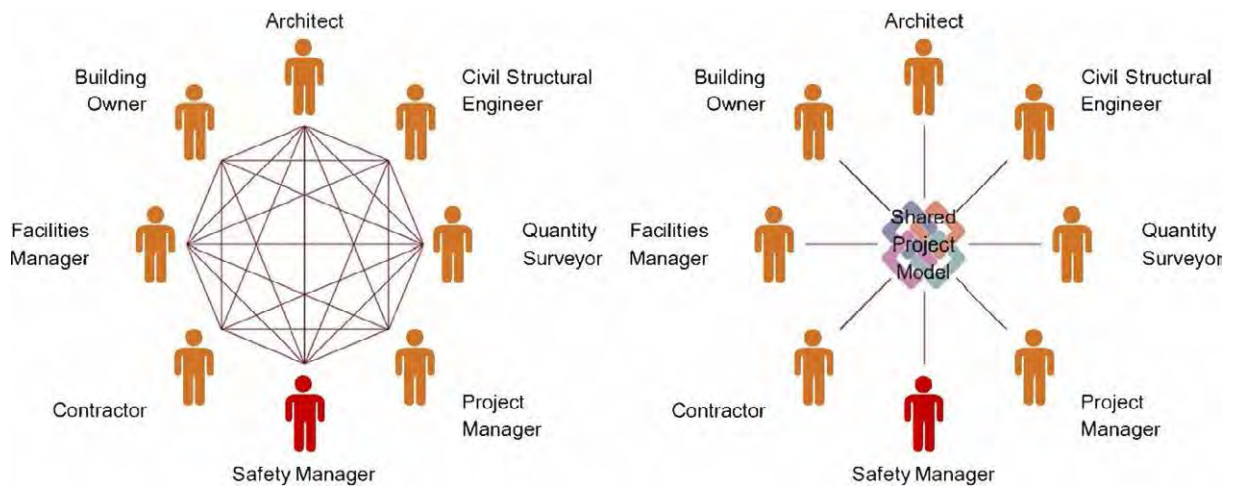


Figura 2.34 Diagramma dei flussi di interazione a seguito di una pianificazione di tipo CAD (a sinistra) e BIM (a destra) (Dalla Mora, et al., 2014).

2.4.1 Monitoraggio del cantiere

Il monitoraggio delle attività edili può migliorare le attività di pianificazione e di risposta dinamica, approdando ad una migliore consapevolezza e prevenzione. Eseguire rilievi dell'avanzamento dei lavori nel tempo può fornire un confronto tra l'as-built e l'as-planned, l'acquisizione dei dati in maniera speditiva può anche essere rivolta a migliorare le condizioni di sicurezza dei lavoratori, in maniera più efficiente rispetto ad attività tradizionali di monitoraggio.

Una ricognizione frequente delle condizioni di cantiere e una comprensione delle relazioni tra le varie attività sono elementi cruciali per un controllo proattivo della qualità della sicurezza. L'acquisizione di nuvole di punti, in maniera sequenziale e ripetuta nel tempo, può essere utilizzata per confrontare il progetto con le attività del cronoprogramma e verificare l'avanzamento dei lavori.

Idealmente un progetto dovrebbe essere realizzato in BIM partendo dalle sue prime fasi; un impiego durante le fasi di costruzione invece potrebbe essere quello di valutare l'aderenza dell'as-built con i disegni di progetto (Figura 2.35).

Inoltre anche nelle fasi di manutenzione, il modello BIM validato dai rilievi effettuati a costruzione ultimata può essere utilizzato per migliorare la pianificazione delle operazioni da eseguire e identificare le corrette procedure di sicurezza a cui attenersi.

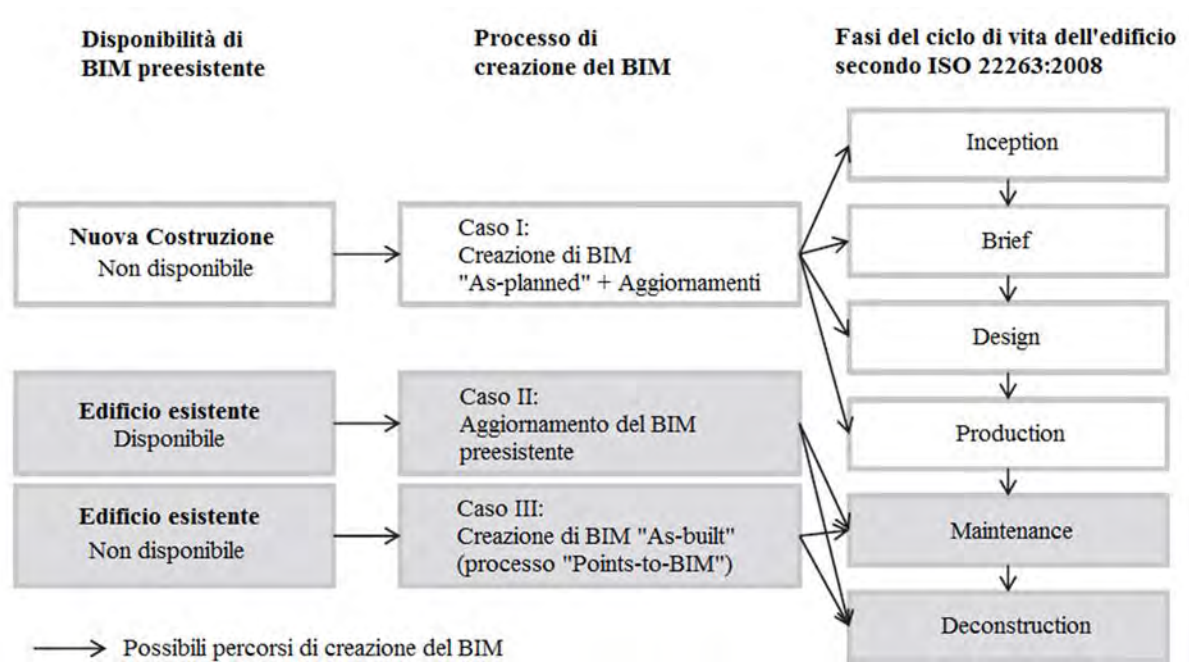


Figura 2.35: Processo di creazione di un modello BIM in nuove costruzioni o in edifici esistenti sulla base della disponibilità di modello preesistente (Volk, et al., 2014).

Il software Tekla Structures è stato utilizzato in una ricerca del VTT Technical Research Centre in Finlandia su un complesso residenziale, utilizzando il BIM 4D per virtualizzare un insieme di regole sviluppate per l'utilizzo temporaneo di dispositivi di sicurezza, sviluppando il modello BIM creato per il progetto e implementandolo con la pianificazione e le disposizioni di sicurezza (Zhou, et al., 2012).

2.4.2 Utilizzo di Smartphone come sistema di allerta per la sicurezza

Una ricerca svolta nel 2013 dalla School of Architecture and Building Science dell'università Coreana Chung-Ang di Seoul (Hyeon-Jin & Chan-Sik, 2013), illustra un metodo di localizzazione e tracciamento automatico dei lavoratori, e un sistema di monitoraggio che integra BIM e smartphone per un'effettiva rilevazione dei rischi e una conseguente notifica di allerta. Un prototipo è stato testato in una piccola stanza e i risultati hanno dimostrato che il sistema ha il potenziale di ridurre i tempi di monitoraggio e di migliorare la prevenzione del rischio di caduta dall'alto in tempo reale.

I sistemi di tracking tradizionali utilizzano dei punti fissi che sono chiamati ricevitori. I sensori ricevono e mandano segnali ma non misurano la direzione. Oggigiorno i cellulari includono una vasta gamma di sensori, come ricevitori GPS, accelerometri, magnetometri e giroscopi.

L'unione di questi sensori fornisce una vasta gamma di informazioni relative a direzioni e distanze misurabili. Per sviluppare e testare un sistema automatico di allerta rischi sono stati utilizzati i software Revit 2013 e Visual studio 2010, oltre allo smartphone Optimus V. Il safety manager assegna la posizione dei rischi sulla mappa del cantiere con un supporto computazionale, come ad esempio prelevando le aperture, i muri, e i ponteggi dalla libreria del software Revit. La figura 2.36 illustra un esempio di area interessata dal rischio di caduta dall'alto; la mappa viene poi convertita in un disegno 2D.

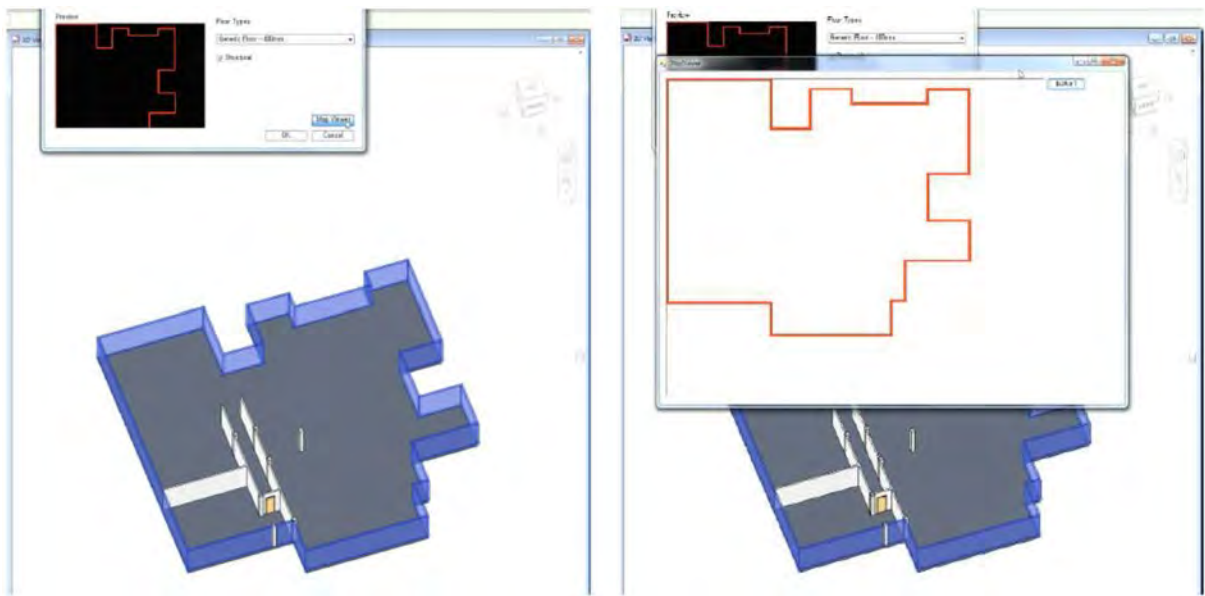


Figura 2.36: Generazione di mappa 2D da modello BIM (Hyeon-Jin & Chan-Sik, 2013).

Dopo la creazione del disegno 2D, la posizione calcolata dallo smartphone è inviata al programma e restituita sulla mappa per mezzo di indicatori rossi. In base alla posizione di questi indicatori, il sistema invia un segnale d'allarme allo smartphone dell'operaio qualora dovesse trovarsi sul perimetro pericoloso. Le informazioni, contenute in un database, sono altresì accessibili in qualsiasi momento al safety manager per ulteriori analisi cronologiche (Hyeon-Jin & Chan-Sik, 2013).

2.5 Utilizzo di Aeromobili a Pilotaggio Remoto

Sebbene negli scorsi anni i droni siano stati ampiamente utilizzati in diversi campi dell'ingegneria (tra cui il monitoraggio e la simulazione del traffico, la verifica di strutture, il controllo di frane, le ispezioni di ponti, ecc.), solo recentemente la tecnologia UAV è apparsa nella letteratura riguardante l'edilizia e le costruzioni.

Il presente capitolo illustra lo stato dell'arte sull'utilizzo di droni nel campo della sicurezza nei cantieri edili. Non vengono quindi prese in considerazione ricerche svolte sull'utilizzo di aeromobili a pilotaggio remoto per altre applicazioni, pur inerenti l'edilizia, come ad esempio l'ispezione di facciate, l'ispezione strutturale e il monitoraggio del progresso dei lavori.

Il primo studio condotto sull'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri è stato pubblicato nel mese di settembre 2012 da parte di un gruppo di ricerca del Georgia Institute of Technology (Irizarry, et al., 2012). Questa ricerca può per certi versi essere considerata il primo passo nell'applicazione della tecnologia drone per il monitoraggio della sicurezza in ambito cantieristico. È stata condotta un'analisi euristica (ossia uno studio sull'usabilità) e una valutazione partecipata sull'utilizzo di un piccolo quadricottero, munito di una videocamera e di un dispositivo di comunicazione remota, per mettere in contatto il safety manager e gli operai edili. Lo studio è stato poi presentato dagli stessi autori due anni più tardi durante il *Construction Research Congress 2014*, tenuto ad Atlanta (Georgia) dal 19 al 21 maggio 2014 (Gheisari, et al., 2014).

La ricerca condotta da Irizarry et al. (2012) non è stata comunque validata da figure operanti sul campo della sicurezza, e solo poche informazioni sono state raccolte. Al fine di colmare le carenze della precedente analisi, ne venne condotta un'altra, ad opera di un gruppo di ricerca dell'University of Florida e dell'University of Nebraska-Lincoln; il progetto aveva lo scopo di investigare le potenziali applicazioni dei droni nel miglioramento delle prassi di sicurezza e di identificarne gli ideali impieghi. I risultati vennero discussi durante il *Construction Research Congress*, tenutosi a San Juan (Puerto Rico) dal 31 maggio al 2 giugno 2016 (Gheisari & Esmaeili, 2016).

L'ultimo studio noto è stato svolto da un gruppo di ricerca della Federal University of Bahia; lo scopo era quello di valutare le prestazioni dei droni nel monitoraggio della sicurezza, basandosi su un database di foto e video raccolti da sorvoli eseguiti su due cantieri attivi in Brasile.

L'esperimento è stato successivamente illustrato durante la *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, tenutasi a Boston (Massachusetts) dal 20 al 22 luglio 2016 (Costa, et al., 2016).

Questo sembra essere, ad oggi, l'unico filone di ricerca esistente sull'impiego di UAV per la sicurezza nei cantieri edili. Nuovi studi sono in corso di sviluppo, al fine di "valutare l'impatto sulla sicurezza delle ispezioni con l'ausilio di droni, in maniera sistematica, concentrandosi su feedback veloci, permettendo imediate azioni correttive, riducendo il tempo di ispezione e semplificando il processo di controllo della sicurezza" (Costa, et al., 2016).

2.5.1 Valutazione sull'utilizzo della tecnologia drone come strumento di controllo della sicurezza

Lo studio propone l'utilizzo di un drone per l'acquisizione e la trasmissione in tempo reale di informazioni riguardanti ciò che accade nel cantiere. Attraverso i dispositivi di comunicazione montati a bordo del velivolo, ossia un microfono e una videocamera, il safety manager può interagire direttamente con gli operai. Nell'ipotetico scenario proposto, gli operai vedrebbero il drone volare intorno al cantiere e, interagendo con esso, potrebbero mettersi in comunicazione con il safety manager. Allo stesso tempo il safety manager otterrebbe una visione in tempo reale sia del cantiere che dei lavoratori. Le informazioni verrebbero visualizzate, tramite l'interfaccia del programma di controllo del drone, attraverso il display del telefono, del tablet o del PC (Irizarry, et al., 2012).

Viene preliminarmente considerato un campione di quattro droni per uso civile presenti sul mercato nel 2012 (Tabella 2.2). In seguito ad alcune considerazioni di tipo economico, oltre all'esigenza di avere la possibilità di trasmettere video e ricevere feedback in diretta, si è deciso di adottare il drone *AR. Drone* commercializzato dalla casa produttrice *Parrot*. Il drone in questione sembra inoltre essere il primo drone immesso sul mercato civile a poter essere controllato da un dispositivo mobile (Apple o Android) tramite il sistema Wi-Fi di bordo. Il prodotto ha inoltre il vantaggio di possedere due videocamere, una frontale e una inferiore. L'applicazione mobile utilizzata è *Flight Record*, in quanto l'applicazione nativa creata da Parrot per l'AR. Drone (*Free Flight*) possedeva la sola funzione di video streaming e non quella di registrazione o cattura di immagini, fondamentale per condurre l'esperimento.

Tabella 2.2: Esempi di droni per uso civile presenti sul mercato (Irizarry, et al, 2012).

Nome prodotto	Casa produttrice	Costo (\$)	Peso (gr)	Durata (min.)	Camera
Scout	Aeryon Labs Inc.	30÷50.000	1.300	25	1080p HD
Draganflyer X8	Draganfly Innovation Inc.	25÷30.000	1.700	20	1080p HD
MD4-1000	Microdrone GmbH	Da 50.000	1.800	88	720p HD
AR. Drone	Parrot	300	420	15	640x480 pixel VGA

Il primo passo della ricerca è stato lo studio euristico sulla valutazione della praticità e della semplicità di utilizzo del sistema da parte dell'addetto alla sicurezza e, in particolare, sull'interfaccia dell'applicazione *Flight Record*. L'interfaccia è stata infatti considerata come un prototipo completamente funzionale all'utilizzo del drone per questo tipo di ispezioni.

L'autore sottolinea l'importanza della nuova relazione che andrebbe a crearsi; i lavoratori si troverebbero ad interagire con il drone, mentre il safety manager dovrebbe interagire con l'interfaccia utente del dispositivo di controllo; in questo senso lo studio euristico condotto sull'interfaccia utente viene reputato funzionale all'analisi dell'efficacia e dell'efficienza di questa tecnologia.

I risultati hanno fornito alcune considerazioni su come migliorare l'interfaccia; a scopo esemplificativo e non esaustivo si riporta, ad esempio, l'esigenza di avere delle icone più intuitive, l'utilizzo di feedback acustici quando un fotogramma viene catturato o l'eliminazione della ridondanza di alcune informazioni non utili. Secondo i ricercatori questa analisi non poteva comunque sostituirsi a un test reale in cui eseguire compiti relativi ai controlli di sicurezza.

Viene condotto un esperimento consistente nell'utilizzo del drone per ispezionare alcune immagini tipiche di cantiere. Il compito dei volontari era di contare il numero di elmetti presenti in 10 immagini differenti relative a contesti edili, proiettate su superfici piane non riflettenti. Si ricorda che l'elmetto è un dispositivo di protezione individuale (DPI) utilizzato dagli operatori edili; determinare se l'operatore indossa o meno l'elmetto è un esempio di operazione che il safety manager dovrebbe compiere in questo tipo di ispezioni visive.

L'esperimento viene quindi condotto in tre diverse condizioni; inizialmente tramite l'utilizzo di un proiettore e di un pannello su cui proiettare le immagini (Figura 2.37), successivamente nelle altre due condizioni un drone viene montato di fronte al pannello (Figura 2.38 e 2.39),

trasmettendo in streaming le immagini catturate dalla camera frontale direttamente al dispositivo del tester (Figure 2.40 e 2.41).

Queste condizioni hanno simulato il modo in cui il drone verrebbe utilizzato nei cantieri. Un iPhone e un iPad sono stati utilizzati come campione esemplificativo di smartphone e tablet. Questi prodotti vengono oggi quotidianamente utilizzati da tutti; oltre ad avere un costo accessibile, gli utenti hanno già un'esperienza pregressa nell'utilizzo degli stessi in ambito quotidiano. Il safety manager è quindi chiamato ad interagire con l'interfaccia presente nei dispositivi, ottenendo informazioni in tempo reale sul cantiere.

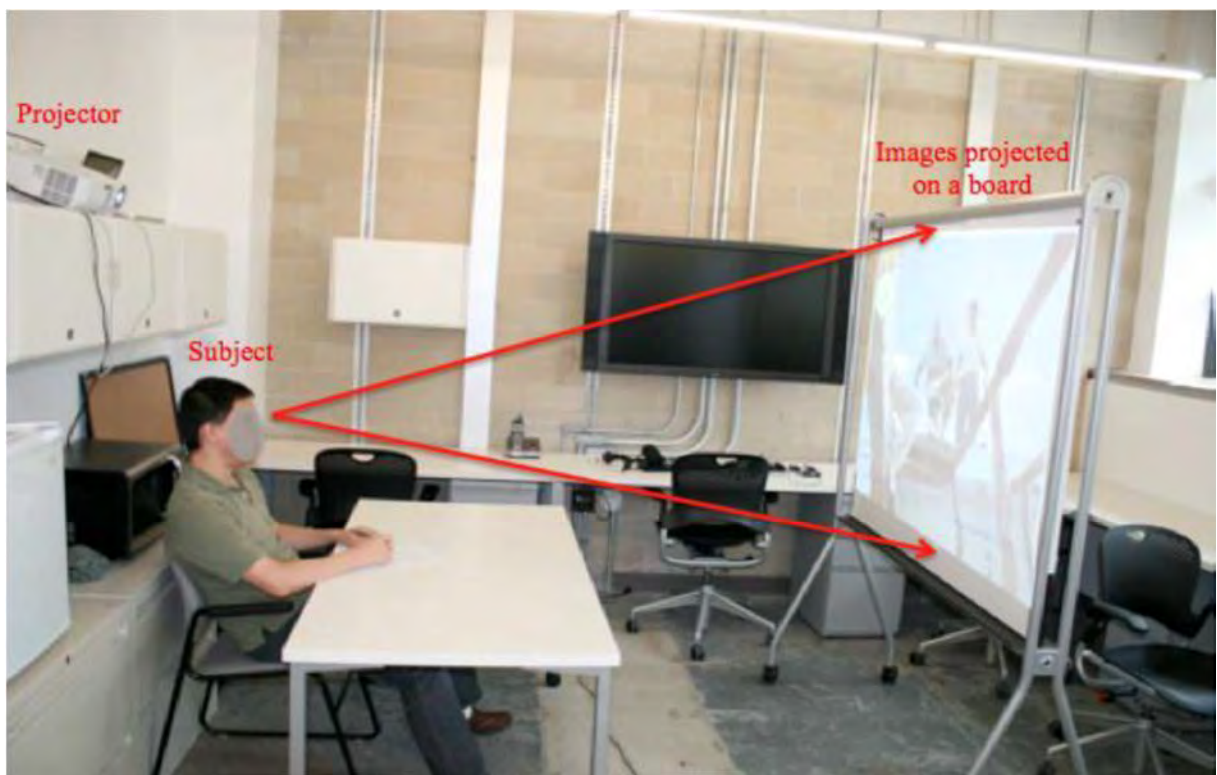


Figura 2.37: Condizioni per l'esperimento di visione immagini da proiettore (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.38: Condizioni per l'esperimento di visione immagini da smartphone e tablet (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.39: Drone montato su un treppiede (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.40: Il soggetto esamina le immagini da smartphone (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.41: Il soggetto esamina le immagini da tablet (Irizarry, et al., 2012).

In queste condizioni, le dimensioni dello schermo sono un fattore rilevante in quanto, se troppo ridotte, potrebbero condurre a delle valutazioni non accurate. La ricerca è stata effettuata non solo con lo scopo di valutare l'esperienza degli utenti durante l'esecuzione del compito di ispezione, ma anche di confrontare i due più comuni dispositivi mobili (smartphone e tablet) per verificare quale dei due fosse stato il più idoneo per effettuare compiti di ispezioni volti al controllo della sicurezza.

Per ogni partecipante, è stata preparata una presentazione di immagini divisa in tre parti; ogni parte conteneva 10 immagini scelte tra 40 differenti immagini di cantieri. I partecipanti hanno dovuto completare i seguenti passaggi in ogni parte:

- Vedere 10 immagini differenti, una alla volta, aventi come oggetto lavoratori nei cantieri edili.
- Ispezionare le immagini e contare il numero di elmetti in ogni immagine entro 5 secondi.
- Dopo 5 secondi l'immagine scompare e i partecipanti hanno 10 secondi per scrivere la loro risposta, successivamente la nuova immagine compare a schermo.
- Dopo aver terminato l'esperimento, ai partecipanti viene chiesto di fornire delle affermazioni riguardo le condizioni visive utilizzando una scala Likert a 7 punti (Tabella 2.3).

L'esperimento è durato circa 25 minuti a partecipante. È stata condotta un'analisi statistica sull'accuratezza del numero di elmetti contati sotto ogni condizione. Il risultato emerso è che a una maggior grandezza dello schermo corrisponde una migliore esecuzione del compito proposto (Grafico 2.1).

Lo schermo del tablet sembra quindi essere un buon compromesso tra portabilità e funzionalità allo svolgimento del compito; lo schermo dello smartphone era invece troppo piccolo per soddisfare l'utente; solamente il proiettore sembra soddisfare completamente i partecipanti in termini di qualità dell'immagine.

Tabella 2.3: Punteggio medio per ogni affermazione soggettiva riferita ai diversi dispositivi di visualizzazione, dati raccolti da questionario con scala Likert da 1 a 7 su un campione di 10 soggetti (Irizarry, et al., 2012).

Affermazione soggettiva	Media (n=10)		
	Proiettore	Tablet	Smartphone
Posso completare questo compito efficacemente	6.4	4.8	3.7
Sono in grado di completare questo compito velocemente	6.3	5.1	4.8
Sono in grado di completare questo compito efficientemente	6.2	4.4	3.7
Sono a mio agio nell'utilizzo di questo sistema	6.3	4.5	3.7
La dimensione delle immagini è sufficientemente grande da poter contare il numero di elmetti	6.7	5.1	3.1
Il compito è stato mentalmente impegnativo	2.7	2.7	3
Il compito è stato psicologicamente impegnativo	1.9	2.5	2.6
L'esecuzione del compito è stata affrettata o precipitosa	2.7	2.9	4.3
In media, la qualità delle immagini era buona	6.3	3.4	2.6
In media, sono soddisfatto dalla facilità con cui ho completato questo compito	6.4	4.6	3.5

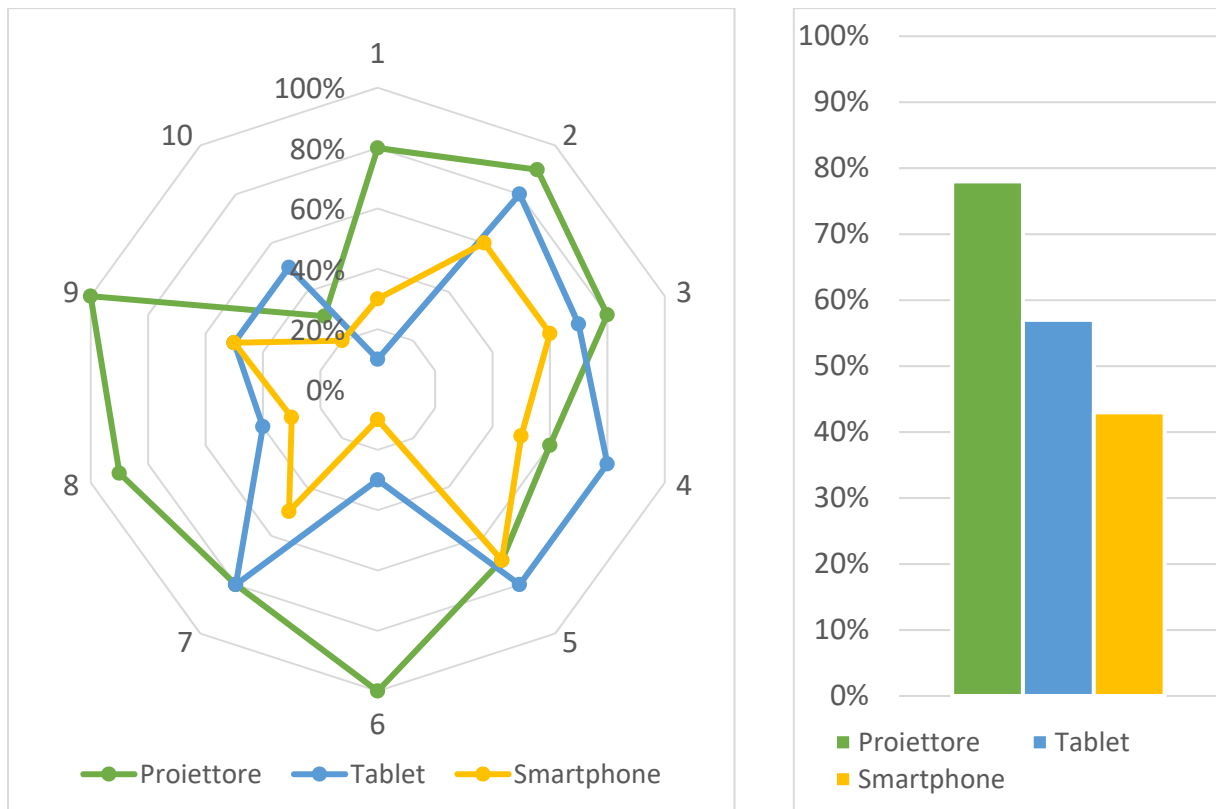


Grafico 2.1 a) Grado di accuratezza dei partecipanti (n=10) per dispositivo utilizzato. b) Grado di accuratezza medio dei partecipanti (n=10) per dispositivo utilizzato.

In conclusione vengono illustrate, sulla base dell'esperienza degli autori, alcune delle caratteristiche che un drone dovrebbe avere (in aggiunta allo streaming video in diretta) per applicazioni di safety inspection:

- **Volo automatico:** Possibilità di impostare dei waypoints da percorrere con l'assistenza minima dell'operatore (Figura 2.42).
- **Interazione vocale:** Il safety manager dovrebbe avere la possibilità di interagire vocalmente con gli operai e, in caso di circostanze critiche, dare indicazioni prima di arrivare fisicamente sul posto (Figura 2.43).
- **Maggior durata della batteria** (la batteria del prodotto utilizzato permetteva un volo di 13 minuti).
- **Camera di miglior qualità:** La camera utilizzata era di tipo VGA (640x480 pixels) con un angolo visuale di 93° per la camera frontale e 64° per quella inferiore. Il drone dovrebbe essere in grado di scattare foto automaticamente a un dato intervallo di

tempo. Un altro problema è che le due camere non possono essere utilizzate simultaneamente.

- Utilizzo su tablet piuttosto che smartphone: In base al questionario gli utenti preferiscono utilizzare il tablet rispetto allo smartphone in quanto lo schermo più ampio fornisce risultati più accurati (Figura 2.44).
- Multitasking: Essere in grado di visualizzare altre informazioni o opzioni come ad esempio invio di immagini per mail, web browsing, normativa vigente in materia di sicurezza, effettuare chiamate Skype. Gli effetti di ciò sulla produttività del safety manager sono tuttavia da investigare.
- Allarmi di emergenza audio/video/vibrazione: Sarebbe ideale avere diversi tipi di sistemi di allerta come nel caso di batteria scarica o atterraggio d'emergenza.
- Ambiente collaborativo integrato: Altre persone coinvolte nel progetto dovrebbero avere la possibilità di assistere il safety manager in determinati casi, poter fornire commenti e visualizzare le informazioni attraverso il loro dispositivo.
- Applicabilità ambientale: Le condizioni ambientali (meteo) potrebbero influire negativamente sulla qualità dei dati raccolti o impedire l'utilizzo del drone come dispositivo di supporto alla sicurezza. Questi problemi dovrebbero essere considerati nella scelta dell'utilizzo di questo strumento (Tabella 2.4).

Tabella 2.4: Indicatori climatici che potrebbero influire sulle operazioni di ispezione (Irizarry, et al., 2012).

Indicatori climatici	Implicazioni sull'utilizzo
Temperatura alta	Sudorazione delle mani dell'operatore
Temperatura bassa	Utilizzo di guanti da parte dell'operatore
Pioggia/Neve	Impermeabilità del drone e del dispositivo di controllo
Vento	Stabilità del drone
Nuvole	Luminosità e riflettività del display

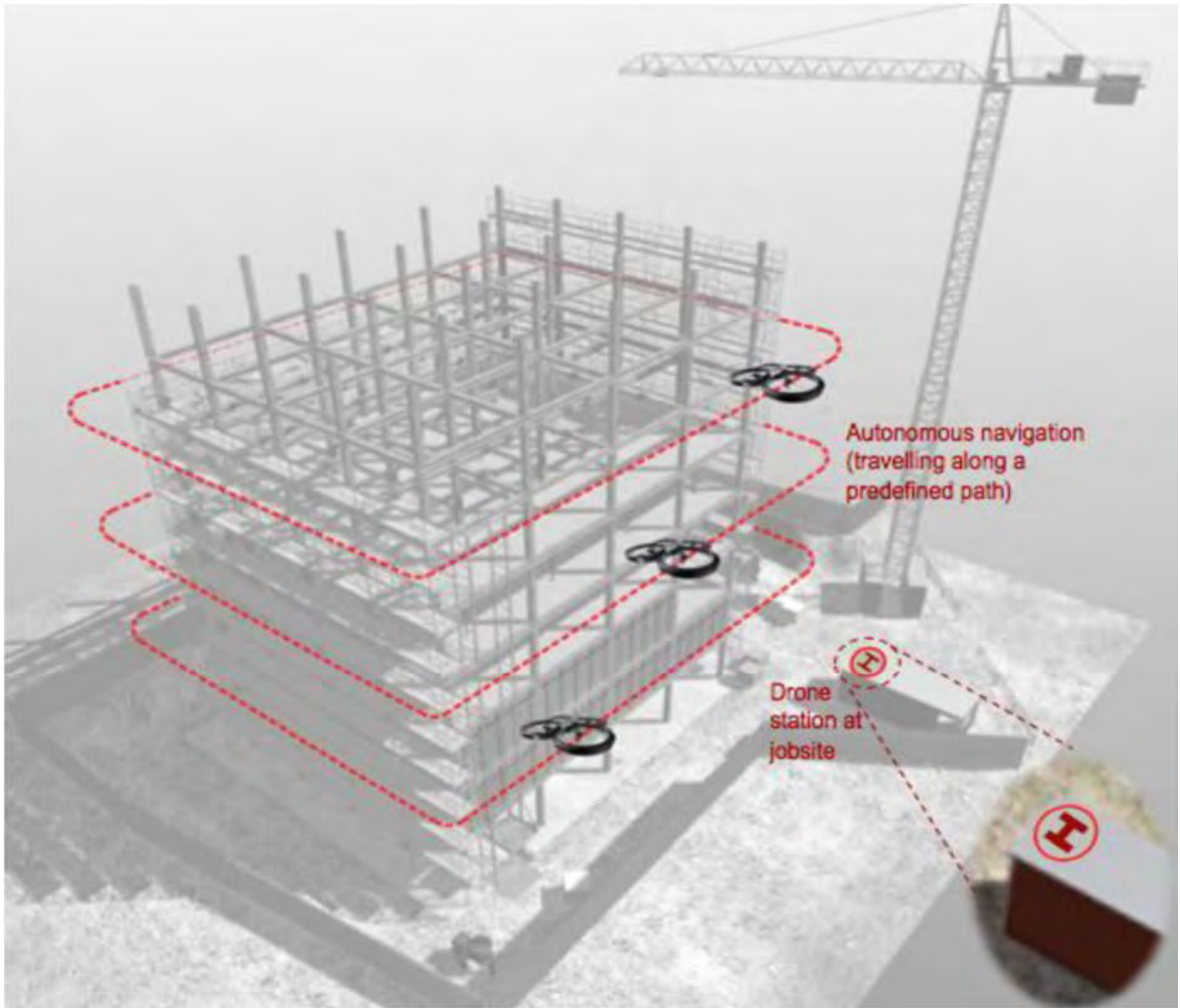


Figura 2.42: Navigazione automatica per mezzo di waypoints o posizioni predefinite. Si noti la presenza di una piattaforma di decollo e atterraggio sopra un baraccamento (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.43: Interazione vocale tra gli operai e il drone (Irizarry, et al., 2012).



Figura 2.44: Il safety manager interagisce con i lavoratori utilizzando il drone attraverso un tablet (Irizarry, et al., 2012).

2.5.2 Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) per la sicurezza in edilizia

Lo studio in questione si pone come proseguimento del precedente (Irizarry, et al., 2012) e intende fornire i requisiti tecnici che dovrebbero avere gli APR per essere utilizzati in contesti di sicurezza in edilizia, oltre a identificare le prassi che potrebbero essere migliorate tramite l'uso di questo mezzo innovativo (Gheisari & Esmaeili, 2016).

Un questionario online è stato distribuito a safety managers in Nebraska, Florida e Georgia, e in totale sono state raccolte 22 risposte valide ai fini statistici. Sono state selezionate dalla letteratura in materia 16 situazioni pericolose che potrebbero essere migliorate dall'utilizzo dei droni. Ai soggetti è stato chiesto con che efficacia e con quale frequenza verrebbero da loro utilizzati i droni per le differenti situazioni proposte (Tabella 2.5). È emerso che le tre situazioni di pericolo più indicate idonee per l'utilizzo del drone sono state "lavori in prossimità di veicoli con braccio o di gru", "lavori vicino cigli non protetti" e "lavori in punti ciechi di macchinari pesanti". Le situazioni che invece emergono essere, a detta dei soggetti intervistati, poco idonee per l'utilizzo del drone, sono quelle che richiedono un'analisi approfondita effettuata dal safety manager in prima persona.

Per un'analisi tecnica, sono state selezionate 16 funzionalità che il drone dovrebbe idealmente avere per effettuare operazioni finalizzate al controllo delle condizioni di sicurezza (Tabella 2.6). È emerso che le tre caratteristiche tecniche più richieste dai soggetti intervistati sono state "Streaming video in diretta", "Alta precisione nella navigazione all'aperto" e "Rilevamento ed evitamento di ostacoli". Queste funzioni permetterebbero al drone di essere il "terzo occhio" del safety manager, l'importanza delle manovre evasive automatiche rende il drone impiegabile in contesti in cui bracci di macchinari o gru potrebbero improvvisamente interferire con il sorvolo, a causa di un cono d'ombra nel campo visivo dell'operatore (i cosiddetti *blind spots*). Una caratteristica importante sembra essere inoltre la robustezza e la durabilità di cui il drone dovrebbe godere per operare in ambienti "ostili" come i cantieri edili, con una protezione contro urti, polvere o acqua. L'operatore dovrebbe avere inoltre la possibilità di inclinare la camera, nonché controllare il veicolo su tutti gli assi (rollio, beccheggio e imbardata) a vantaggio della massima manovrabilità. L'interfaccia grafica dovrebbe essere il più familiare e intuitiva possibile, e compatibile con i dispositivi mobili in commercio. La differenza di punteggio tra lo streaming video e quello audio, oltre alla precisione nella navigazione all'aperto rispetto che al chiuso, delineano le condizioni generali di un cantiere, situato spesso all'aperto e in cui è richiesto un controllo visuale dei macchinari e della forza lavoro.

Tabella 2.5: Fattori di efficacia, frequenza e importanza nell'uso di SAPR per migliorare il monitoraggio della sicurezza e le prassi di controllo nel cantiere (Gheisari & Esmaili, 2016), dati raccolti da questionario con scala Likert da 1 a 6 su un campione di 22 soggetti. Il fattore di importanza è stato calcolato moltiplicando i valori medi di efficacia e frequenza.

Situazioni di pericolo o attività legate alla sicurezza	Efficacia		Frequenza		Fattore di importanza
	Mediana	Media	Mediana	Media	
Lavori in prossimità di veicoli con braccio o di gru	5	4.5	3.5	3.55	15.95
Lavori vicino cigli non protetti	5	4.27	4	3.73	15.93
Lavori in punti ciechi di macchinari pesanti	5	4.24	3	3.50	14.83
Condurre sopralluoghi a seguito di incidenti	4	3.77	4	3.67	13.83
Utilizzare veicoli con braccio in prossimità di linee elettriche sopraelevate	4	4.00	4	3.38	13.52
Ispezioni sul livello di pulizia	3.5	3.82	3	3.45	13.19
Verifiche sull'utilizzo idoneo di dispositivi anticaduta	4	3.81	3	3.36	12.81
Lavori in trincee non protette	4	3.55	4	3.24	11.48
Lavori in prossimità di materiali pericolosi	3	3.67	3	3.20	11.73
Ispezioni sull'utilizzo idoneo dei DPI	4	3.64	2	2.91	10.58
Ispezioni su accessi a zone ad accesso limitato	3	3.45	2.5	2.82	9.74
Ispezioni su idoneità di scale e ponteggi	3	3.14	3	3.05	9.57
Controllo di movimentazioni a rischio	2	2.82	2	2.41	6.79
Verifica delle protezioni dei macchinari	2	2.55	2	2.27	5.79
Controllo dei requisiti di ergonomia	2	2.27	1	1.95	4.44
Uso appropriato dei dispositivi di bloccaggio di sicurezza (tag out/lock out)	1	1.74	1	1.76	3.06

Tabella 2.6: Importanza di alcune funzioni tecniche dei SAPR per migliorare il monitoraggio della sicurezza e le prassi di controllo nel cantiere, dati raccolti da questionario con scala Likert da 1 a 6 su un campione di 22 soggetti (Gheisari & Esmaeili, 2016).

Funzioni	Importanza		Funzioni	Importanza	
	Mediana	Media		Mediana	Media
Streaming video in diretta	6	5.41	Decollo e atterraggio automatici	5	4.73
Alta precisione nella navigazione all'aperto	5.5	5.32	Sorvolo automatico	5	4.50
Rilevazione ed evitamento di ostacoli	5.5	5.27	Streaming audio in diretta	5	4.50
Robustezza e durabilità	5	5.27	Alta precisione nella navigazione al chiuso	5	4.36
Accuratezza della videocamera	5	5.23	Capacità di mappatura ad alta risoluzione	4.5	4.27
Compatibilità con altri dispositivi mobili	5	5.09	Rilevatori di movimento	4	4.09
Interfaccia semplice e interattiva	5	5.00	Manipolatore o effettore	4	3.77
Portabilità	5	4.91	Sensori termografici	4	3.73

In ultima istanza i safety managers intervistati hanno fornito informazioni su alcune variabili (altezze, distanze, tempi e luoghi) con cui utilizzerebbero ipoteticamente un drone per svolgere il loro compito. I risultati dimostrano che l'altezza d'impiego preferita sarebbe tra 30 e 60 metri, che il tempo di volo ideale sarebbe inferiore ai 30 minuti, e che la distanza tra il drone e l'operatore durante il sorvolo sarebbe inferiore a 150 metri. Tutti i parametri soddisferebbero lo scenario normativo italiano ad oggi vigente (Tabella 2.7).

In conclusione, il drone ideale potrebbe essere un piccolo quadricottero ad eliche protette, equipaggiato solamente con un sensore audio e video a streaming diretto. La possibilità di muovere il sensore video sarebbe preferita, l'interfaccia di comando dovrebbe essere compatibile con i dispositivi mobile in commercio, non sarebbe necessario nessun tipo di infrastruttura se non una stazione di ricarica e dei cicli di manutenzione periodica del velivolo, oltre all'addestramento del pilota secondo le vigenti normativi. L'aeromobile dovrebbe

prevalentemente operare ad intervalli frequenti ad altezze inferiori a 60 metri e distanze inferiori a 150 metri dall'operatore.

Tabella 2.7: Parametri di sorvolo ideali di un drone, ad altezze, distanze, tempi e luoghi differenti per condurre ispezioni visive sulla sicurezza (Gheisari & Esmaeili, 2016).

Variabili	Frequenza		Variabili	Frequenza	
	Mediana	Media		Mediana	Media
Altezza < 30 m	5	4.67	Tempo < 30 min.	5	4.82
30 m < Altezza < 60 m	5	4.82	30 min. < Tempo < 1 ora	4.5	4.32
60 m < Altezza < 120 m	4	4.00	1 ora < Tempo < 2 ore	3.5	3.09
120 m < Altezza	3	2.95	2 ore < Tempo	2	2.68
Distanza < 150 m	6	4.65	Ambiente interno	2	2.41
150 m < Distanza < 1.5 km	5	3.80	Ambiente esterno	6	5.73
1.5 km < Distanza < 8 km	2	2.32	Posti inaccessibili	5	4.82
8 km < Distanza	1	2.30			

2.5.3 Valutazione delle prestazioni di Aeromobili a Pilotaggio Remoto per ispezioni sulla sicurezza

Il presente studio ha lo scopo di valutare le applicazioni della tecnologia UAV per ispezioni di sicurezza nei cantieri, concentrandosi su utilità, prestazioni e rischi associati all'utilizzo di questa tecnologia (Costa, et al., 2016). Per far ciò sono stati analizzati due casi studio in Brasile (Tabella 2.8).

La ricerca fa parte di un progetto sviluppato in collaborazione tra la Federal University of Bahia il Georgia Institute of Technology e lo scopo è stato quello di definire delle linee guida per applicare la tecnologia UAV per ispezioni di sicurezza.

È stato somministrato un questionario volto a valutare l'indice di importanza relativa (IIR) di 25 items che solitamente vengono verificati in una ordinaria *safety checklist*, dividendoli in 3 categorie in base alla distanza da cui vengono catturate le immagini (Tabella 2.9). Tale indice è stato calcolato dividendo la somma di tutte le singole valutazioni per il prodotto tra il livello più alto di valutazione possibile (5) e il numero di partecipanti al sondaggio (12). L'analisi è

stata svolta verificando che ogni elemento della checklist potesse essere visualizzato attraverso i dati raccolti.

Tabella 2.8: Informazioni sui casi studio A e B (Costa, et al., 2016).

	Caso studio A	Caso studio B
Foto		
Descrizione	Residenziale sovvenzionata	Torre residenziale
Superficie lotto (m ²)	150.000	2.500
Superficie costruita (m ²)	91.000	151.578
Numero unità	1880 unità – 91 edifici a 5 piani – 5 edifici a 3 piani	104 unità – 1 edificio da 26 piani
Tempo di costruzione	720 giorni	780 giorni
Operai impiegati	600	220
Aspetti salienti sulla sicurezza	Getti CLS, lavori in quota, montaggio e smontaggio cas-seforme in acciaio, pulizia del sito, opere provvisionali e gestione dei rifiuti	Lavori in facciata, protezioni collettive, protezioni individuali, pulizia del sito, opere provvisionali e gestione dei rifiuti
Periodo osservazioni	Ottobre 2015 – marzo 2016	Novembre 2015 – marzo 2016
Numero sopralluoghi	4	3
Numero voli	14	9
Numero immagini	579	722
Tempo registrazione video	39:02	09:48
Distanza massima (m)	734.0	173.5
Altezza massima (m)	120.0	76.8
Durata totale voli (h)	2:07:43	1:15:43

Tabella 2.9: Indice di importanza relativa per i compiti di ispezione sulla sicurezza da UAV, dati raccolti da questionario con scala Likert da 1 a 5 su un campione di 12 soggetti (Costa, et al., 2016).

Lungo raggio	ΣV	IIR	Lungo raggio	ΣV	IIR
Recinzione perimetrale	51	0.85	Deposito materiali	47	0.78
Condizioni di attrezzatura, materiale e viabilità	50	0.83	Parcheggi e vie d'emergenza	45	0.75
Area preassemblaggio armature e casseforme	49	0.82	Contenitori dei rifiuti	44	0.73
			Stato di erosione	44	0.73
Medio raggio	ΣV	IIR	Medio raggio	ΣV	IIR
Lavoratori protetti da caduta	52	0.87	Reti e tavole di sicurezza	51	0.85
Rampe e piste protette da guardrail e libere da ostruzioni	51	0.85	Operatori con DPI	45	0.75
			Rifiuti rimossi con scivoli	44	0.73
Corto raggio	ΣV	IIR	Corto raggio	ΣV	IIR
Armature in acciaio scoperte	52	0.87	Area di lavoro pulita	47	0.78
Piattaforme di lavoro aeree con protezioni anti caduta	52	0.87	Protezione da caduta dei carichi sospesi	47	0.78
Montaggio e smontaggio casseforme	51	0.85	Stock di materiali vicini alla gru o all'argano	45	0.75
Area di rifornimento e manutenzione dell'attrezzatura	50	0.83	Isolamento dell'area di operazione della gru	43	0.72
I Ponteggi sono a piombo e dotati di controventatura	49	0.82	Mezzi pesanti	43	0.72
Segnaletica per zona di carico e scarico	48	0.80	Stock di materiali protetti dalla pioggia	40	0.67
Gli stalli per sabbia e ghiaia sono vicini a betoniera e argano	47	0.78			

Sono stati realizzati in tutto 23 voli e ognuno di essi ha avuto uno scopo definito prima del decollo, ad esempio controlli basati sulla checklist, controlli dettagliati su un particolare aspetto della sicurezza durante le lavorazioni o voli finalizzati alla raccolta di dati per la generazione del modello 3D. Il dispositivo utilizzato per questo studio è stato il *Phantom 3 Advanced*, della casa produttrice *DJI*.

Dall'analisi effettuata gli elementi più importanti risultano essere: la recinzione perimetrale, le condizioni di attrezzatura, materiale e viabilità, e l'area preassemblaggio armature e casseri per la prima categoria (Overview). Per quanto riguarda la categoria a medio raggio risultano elementi importanti: i lavoratori protetti da caduta, le rampe e piste protette da guardrail e libere da ostruzioni, e le reti e le tavole di sicurezza. Infine per l'ispezione a corto raggio: le armature in acciaio scoperte, le piattaforme di lavoro aeree con protezione anti caduta e il montaggio e lo smontaggio dei casseri emergono con un indice di importanza relativa elevato. Analizzando i risultati ottenuti, il grafico 2.2 mostra il numero degli elementi della checklist visualizzati in entrambi i progetti.

Il test effettuato nel cantiere A ha fornito l'87% di elementi visualizzati, mentre nel restante 13% dei casi non è stato possibile raccogliere dati sia per questioni legate all'ampia estensione del sito (150.000 m²) che per il numero di lavorazioni effettuate contemporaneamente. Nei casi in cui l'ispezione non sia stata completata in maniera soddisfacente molto spesso ciò è stato imputabile alle capacità del pilota e all'allenamento dell'osservatore.

A causa della natura del cantiere B, l'efficacia della visualizzazione di alcuni elementi è stata del 58%, ossia molto inferiore rispetto a quella del progetto A; il sito in questione infatti si sviluppava in altezza e in un'area urbana costituita da edifici alti. La difficoltà ad agganciare i satelliti GPS si è spesso verificata nelle fasi di decollo nel sito A. Inoltre i forti venti e la limitazione della tecnologia UAV per ragioni di sicurezza sono stati determinanti nei risultati di questo test.

In generale gli elementi della checklist rilevati a distanza maggiore, con una percentuale di 96% nel progetto A e di 88% nel progetto B, includono soprattutto la pulizia del cantiere, gli apprestamenti temporanei e la visualizzazione dei rifiuti. Per quanto riguarda le osservazioni a medio raggio, con un'incidenza del 96% nel progetto A e del 71% nel progetto B, si rilevano prevalentemente dispositivi di protezione individuale e collettiva (Grafico 2.3).

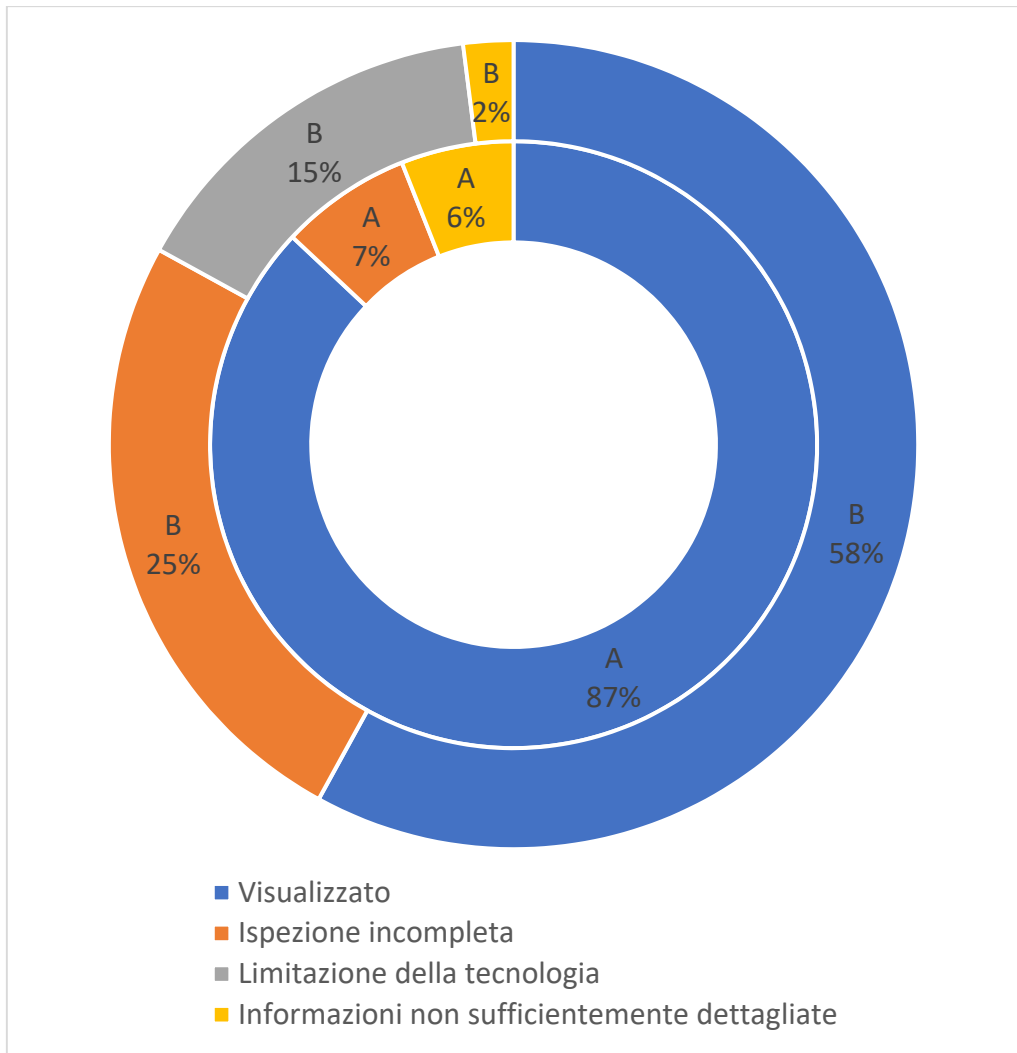


Grafico 2.2: Percentuale di elementi visualizzati con una qualità accettabile; il grafico mostra il caso studio A nell’anello interno e il caso studio B nell’anello esterno (Costa, et al., 2016).

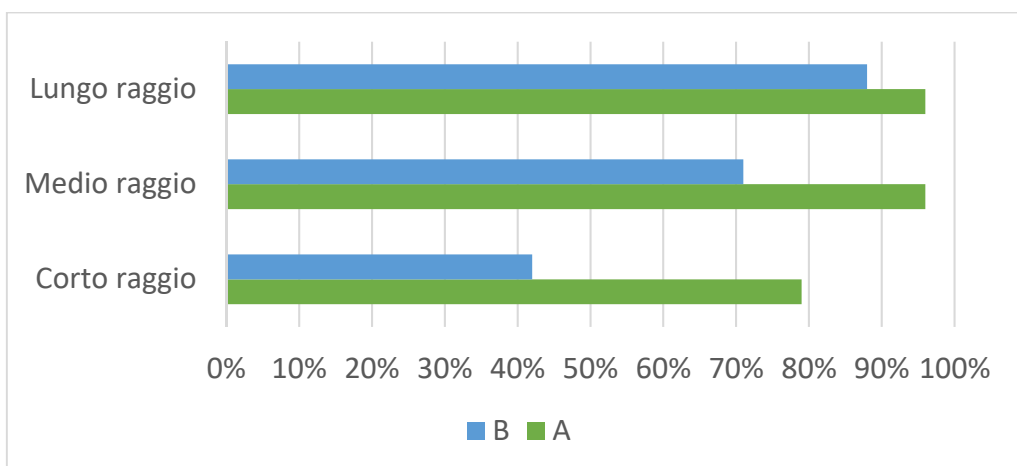


Grafico 2.3: Percentuale di elementi visualizzati da fotogrammi relativi all’ispezione di sicurezza in base alla diversa distanza da cui è avvenuta la raccolta dati da drone (Costa, et al., 2016).

In generale l'autonomia della batteria non è risultata essere un elemento critico in questi test, e il tempo medio di volo è stato di 9:08 minuti per ogni sessione. Sono stati inoltre rilevati in entrambi i casi problemi di stabilità che potrebbero essere risolti per migliorare la qualità dei dati visivi raccolti.

Riguardo l'affidabilità dell'equipaggiamento, si sono verificati 15 problemi; 11 relativi a perdita di segnale durante il volo (con il conseguente utilizzo, in 6 casi, della funzione return to home). La difficoltà di aggancio di satelliti e la velocità del vento (circa 6 km/h) sono state criticità caratteristiche del cantiere B.

Durante tutte le attività non si sono verificati problemi che potessero causare danni alle cose o alle persone, e l'attività di rilevamento non ha costituito interferenza sostanziale nelle lavorazioni, eccetto l'esigenza di fermare la gru in alcuni voli nel progetto B.

È stato inoltre somministrato un questionario per esaminare i problemi sia dei lavoratori che dei safety managers sulle preoccupazioni riguardanti l'interferenza tra il drone ed eventuali rischi (come ad esempio caduta del velivolo) o disturbi (invasione della privacy) potenzialmente verificabili (Tabella 2.10).

Secondo il questionario, il grado di invasione della privacy da parte dei lavoratori è basso (1.94) così come la distrazione dalle attività lavorative (2.00) e la preoccupazione che il drone potesse cadere o urtare gli operai (1.89). Per i safety managers inoltre il dispositivo è sembrato facile da utilizzare (3.89), con una bassa interferenza sulle lavorazioni (1.44) e con pochi problemi riguardanti rischi di caduta o collisioni.

Secondo i safety managers, la possibile adozione di questa tecnologia dipende dal costo di acquisto del velivolo, dalla disponibilità del supporto tecnico, dall'addestramento come piloti o dall'assunzione di un pilota addestrato durante queste operazioni.

In conclusione **non sono stati rilevati problemi sulla privacy o rischi di collisione o caduta**. Sarebbero tuttavia da analizzare eventuali rischi non meglio identificati in questa fase di ricerca, anche a beneficio della valutazione di un effettivo apporto positivo alla sicurezza complessiva del cantiere conseguentemente all'adozione di questa tecnologia.

Ci sono delle aspettative che questi risultati possano contribuire ad aumentare l'efficacia delle ispezioni sulla sicurezza anche se questa ricerca non ne ha misurato gli impatti. Nuovi studi sono in via di sviluppo secondo quanto dichiarato dagli stessi autori.

Tabella 2.10: Percezione dei lavoratori e dei safety managers riguardo i rischi associati all'utilizzo del drone, dati raccolti da questionario con scala Likert da 1 a 5 su un campione di 18 lavoratori e 9 addetti alla sicurezza (Costa, et al., 2016).

Percezione dei lavoratori	Soggetti	Media	Deviazione
“Durante il volo qual è stato il tuo livello di...”	intervistati		standard
Percezione di invasione della privacy	18	1.94	1.11
Distrazione dal lavoro	18	2.00	0.69
Preoccupazioni riguardo collisioni o cadute	18	1.89	1.18
Percezione degli addetti alla sicurezza	Soggetti	Media	Deviazione
“Durante il volo qual è stato il tuo livello di...”	intervistati		standard
Facilità nell'uso dell'UAV da parte del team di ricerca	9	3.89	1.05
Interferenza tra il drone e le attività di progetto	9	1.44	1.01
Percezione dell'accettabilità dell'uso del drone da parte dei lavoratori	9	4.56	1.33
Preoccupazioni riguardo i rischi di caduta o collisioni	9	2.22	0.97

3. Studio di valutazione sull'impiego dei droni per la sicurezza nei cantieri

3.1 Contesto normativo

Al fine di una valutazione dell'impiego di droni per compiti riguardanti la sicurezza nei cantieri, viene di seguito riportato un estratto del Regolamento ENAC "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, 2016).

I mezzi aerei a pilotaggio remoto impiegati o destinati all'impiego in operazioni specializzate o in attività scientifiche, sperimentazione e ricerca, costituiscono i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) e ad essi si applicano le previsioni del Codice della Navigazione secondo quanto previsto dal Regolamento ENAC "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto".

In tutte le operazioni il pilota deve essere in grado di mantenere il contatto visivo diretto con l'APR (VLOS Visual Line Of Sight), in maniera tale da monitorarne il profilo di volo nei riguardi di altri aeromobili, persone, imbarcazioni, veicoli e infrastrutture allo scopo di evitare le collisioni.

Le operazioni in VLOS sono consentite, di giorno, fino ad un'altezza massima di **150 m** AGL (Above Ground Level) e fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di **500 m**, e devono essere condotte in modo sicuro e senza arrecare danni a terzi. Distanze e altezze superiori possono essere valutate e, se del caso, autorizzate dall'ENAC a seguito della presentazione di adeguata valutazione del rischio da parte dell'operatore SAPR.

Le operazioni dei SAPR non possono essere condotte all'interno di ATZ (le zone di traffico degli aeroporti - in inglese Aerodrome Traffic Zone) e nelle aree sottostanti le traiettorie di decollo e atterraggio oppure ad una distanza inferiore a **5 km dall'aeroporto** (ARP o coordinate geografiche pubblicate), laddove non sia istituita una ATZ a protezione del traffico di aeroporto.

Il sorvolo di assembramenti di persone, per cortei, manifestazioni sportive o inerenti forme di spettacolo o comunque di aree dove si verificano concentrazioni inusuali di persone è in ogni caso proibito.

I SAPR possono essere impiegati in operazioni specializzate non critiche o critiche:

- Per operazioni specializzate "non critiche" si intendono quelle operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di

aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani e infrastrutture sensibili.

- Per operazioni specializzate "non critiche" si intendono quelle operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani e infrastrutture sensibili.

Prima di iniziare operazioni "non critiche", l'operatore deve presentare all'ENAC la dichiarazione che attesti la rispondenza alle applicabili sezioni del presente Regolamento e indichi le condizioni e i limiti applicabili alle operazioni di volo previste, inclusa, eventualmente, la necessità di operare in spazi aerei segregati. La dichiarazione è resa dall'operatore utilizzando esclusivamente l'accesso al sito web dell'Ente fornendo le informazioni e dati previsti nella procedura, inclusi i dati della targhetta identificativa del SAPR.

L'operatore è responsabile di valutare il rischio associato alle operazioni ed il permanere delle condizioni che fanno ritenere non critiche le operazioni.

Nei casi di operazioni non critiche, tale capacità viene dichiarata dall'operatore secondo quanto precedentemente illustrato.

Le operazioni specializzate condotte con SAPR di massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg sono considerate non critiche in tutti gli scenari operativi, a condizione che gli aspetti progettuali e le tecniche costruttive dell'APR abbiano caratteristiche di inoffensività, precedentemente accertate dall'ENAC o da soggetto da esso autorizzato. Per la conduzione delle operazioni è sufficiente che l'APR venga pilotato da persone in possesso di un Attestato.

Le operazioni specializzate condotte con APR di massa al decollo minore o uguale a 0,3 kg con parti rotanti protette da impatto accidentale e con velocità massima minore o uguale a 60 km/h, sono considerate non critiche in tutti gli scenari operativi. Il pilota, al quale non è richiesto il possesso di un Attestato deve comunque garantire che le operazioni siano svolte in osservanza delle regole di circolazione.

La seguente tabella 3.1 riporta un confronto tra i limiti imposti dal regolamento ENAC e quelli imposti dal regolamento FAA statunitense. È importante considerare tali limiti normativi perché influenzano fortemente la versatilità di impiego dello strumento.

Tabella 3.1: Tabella di confronto tra i limiti imposti dal regolamento ENAC italiano e quelli imposti dal regolamento FAA statunitense per voli effettuati con droni regolarmente registrati e con condizione di VLOS (Visual Line Of Sight) sempre garantita (Federal Aviation Administration, 2016 e Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, 2016).

	ENAC	FAA
Peso massimo	25 Kg	25 Kg (55 lbs)
Volo diurno/notturno	Solo diurno	Solo diurno
Osservatore	Facoltativo	Facoltativo
Velocità massima	N/D (< 60 km/h in non critico)	160 kmh (100 mph)
Altezza massima dal terreno	150 m	120 m (400 piedi)
Distanza massima dal pilota	500 m	VLOS
Visibilità dalla stazione di controllo a terra	VLOS	5 km (3 miglia)
Età minima pilota	18 anni	16 anni
Distanza da aeroporto	5 km	8 km (5 miglia)
Sempre inoffensivo	Si se < 0,3 kg	N/D
Inoffensivo su certificazione	< 2 kg e <60 km/h	N/D
Ultimo aggiornamento	24/03/2017	05/12/2016

3.2 Valutazione del rischio intrinseco

Un drone di 25 Kg può essere letale; questa nuova tecnologia ha bisogno di sperimentazioni e regolamentazioni affinché il suo utilizzo possa espandersi. Comprendere e minimizzare il rischio che questi prodotti possono causare è la chiave per poterli utilizzare in maniera legale e sicura. Nonostante la Federal Aviation Administration abbia concesso recentemente alcune liberalizzazioni sul regolamento, in molti casi i droni non sono autorizzati a volare su assembramenti o per lunghe distanze. L'agenzia nel 2016 aveva pianificato una proposta per permettere ai droni di volare in prossimità di persone ma la stessa è stata rigettata per preoccupazioni riguardanti l'incolumità dei cittadini.

Alcuni test sono stati condotti nel mese di marzo del 2017 dal Federal Aviation Administration's Office of Unmanned Aircraft Systems Integration, in collaborazione con Mid-Atlantic Aviation e l'Institute for Critical Technology and Applied Science. I risultati sono volti al supporto del legislatore, non solo statunitense ma a livello mondiale.

Un manichino da crash test, equipaggiato con 15 sensori in testa e sul collo, è stato collocato su una sedia e sono stati condotti dei test per determinare l'entità dei danni generati da una collisione del drone sul corpo umano; è stato indotto un impatto tra il manichino e un DJI Phantom 3, un comune quadricottero commerciale. L'impatto ha danneggiato le eliche del drone, rotto la fusoliera e sganciato la camera, ma studi più approfonditi sono necessari a capire quale possa essere l'effettiva entità del danno su di un essere umano (Figure 3.1 e 3.2).

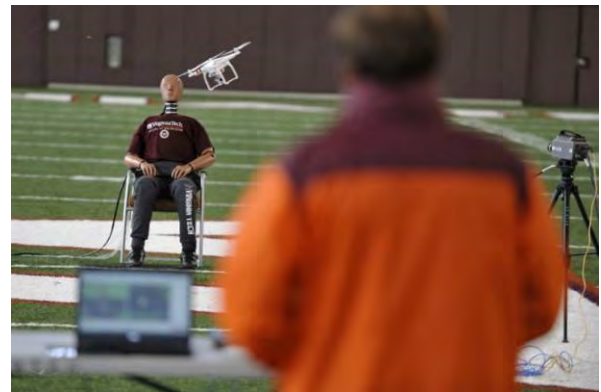


Figure 3.1 e 3.2: DJI Phantom 3 nel momento dell'impatto con il manichino.

Lo scopo di questo test è stato quello di aprire una nuova frontiera sulle operazioni con i droni, oltre a mettere alla luce i veri effetti sulla sicurezza in caso di incidente. I test possono determinare fino a che punto il volo è considerabile sicuro, poiché un drone può sempre avere un malfunzionamento a causa di un guasto dei diversi sistemi di bordo. Il volo sopra gli assembramenti rimane controverso e soggetto a un intenso dibattito. In base a una ricerca dell'University of Alabama, in Huntsville, si è rilevato che piccoli droni fatti di plastica tendono a rompersi quando impattano con un oggetto avente le stesse proprietà di una testa umana, non causando danni gravi al soggetto coinvolto.

L'azienda SZ DJI Technology CO. Leader mondiale nella produzione di droni, ha rilasciato ad inizio marzo uno studio secondo il quale droni di peso pari o inferiore a 2.2 kilogrammi comportino rischi minimi per le persone. Anche la CNN sta conducendo una propria ricerca sulla sicurezza del volo su assembramenti per applicazioni giornalistiche. L'utilizzo di tecnologie come paracadute, paraeliche e gabbie di protezione, dispositivi di rilevamento degli ostacoli o sistemi montati in ridondanza (come batterie o sensori aggiuntivi) aiuterebbero a ridurre eventuali risultati catastrofici in caso di avaria di uno o più sistemi.

3.3 Il questionario

Lo scopo del questionario, realizzato nell'ambito di questa tesi di laurea, è quello di valutare alcuni parametri tra cui l'efficacia, l'importanza e la frequenza nell'utilizzo di droni aerei per svolgere operazioni inerenti la sicurezza nei cantieri in cui si effettuano lavori edili o di ingegneria civile.

Il questionario, contenente 79 domande suddivise in 5 sezioni, è stato somministrato in maniera elettronica tramite la piattaforma "Moduli" di Google ad un campione di 32 professionisti operanti nel settore della sicurezza nei cantieri (coordinatori per la sicurezza e tecnici della prevenzione nell'ambiente e nei luoghi di lavoro). Le risposte sono state raccolte dal giorno 6/12/16 al giorno 19/12/16.

Le domande riguardano l'efficacia, la frequenza e l'importanza che dovrebbero caratterizzare l'impiego del drone in determinate situazioni, le caratteristiche e le funzionalità che dovrebbe avere, nonché la strumentazione di bordo di cui dovrebbe essere dotato per poter svolgere efficacemente attività inerenti il controllo della sicurezza nei differenti scenari ipotetici proposti.

Le domande sono state tratte dai questionari somministrati da Gheisari & Esmaeili (2016) e da Costa, et al. (2016); questo per poter permettere un confronto tra le esigenze di professionisti che operano in realtà geografiche e normative differenti.

Oltre alle domande volte all'analisi delle caratteristiche intrinseche del campione (età, genere, anni di esperienza lavorativa, regione di provenienza, titolo di studio e conoscenza dell'argomento) sono state poste domande specifiche riguardanti parametri che caratterizzano l'ipotetico impiego del drone per gli utilizzi oggetto di questa tesi, in particolare le domande erano riferite ad attività, strumentazione o funzionalità, altezze, distanze e tempi di volo ottimali secondo il parere dei soggetti intervistati.

In tutte le sezioni sono state utilizzate scale likert a 6 punti, ad eccezione dell'ultima sezione in cui sono state utilizzate scale likert a 5 punti (in analogia con i questionari di confronto).

Per ogni voce è indicato l'IIR (Indice di Importanza Relativa), ossia un numero compreso tra 0 e 1 ottenuto dividendo il punteggio medio per il valore massimo espresso dalla scala likert di riferimento; tale valore viene indicato sia per il campione italiano che per quello estero di riferimento tramite una barra grafica, per un confronto più agevole. Viene infine indicata la differenza della posizione relativa, in termini di indice di importanza, tra le risposte del campione italiano e quello dell'indagine estera di riferimento (ad esempio, una freccia verde con il numero 4 indica che quella determinata attività o strumentazione si trova 4 posizioni più

in alto, in termini di indice di importanza, rispetto alle risposte del campione estero di riferimento). Questo permette di fare determinate considerazioni, dovute non solo alla differenza normativa ma anche alla differente cultura della sicurezza esistente tra l'Italia e l'estero. Il Paese di riferimento in tutte le sezioni è gli Stati Uniti d'America e i dati fanno riferimento al questionario somministrato da Gheisari & Esmaeili (2016) con 22 soggetti intervistati, ad eccezione dell'ultima sezione in cui si fa riferimento al Brasile, ed in quel caso i dati fanno riferimento al questionario somministrato da Costa, et al., (2016) con 12 soggetti intervistati.

Per maggiori dettagli sui questionari da cui sono state tratte le domande e sui dati raccolti oggetto del confronto si faccia riferimento al capitolo di questa tesi relativo allo stato dell'arte ed ai riferimenti bibliografici posti alla fine del testo.

3.3.1 Caratteristiche del campione

La popolazione analizzata possiede un'età anagrafica media di 43 anni, e un'esperienza lavorativa progressiva media di 15 anni. Il rapporto tra uomini e donne è di 7 a 1 (28 uomini e 4 donne). La regione di provenienza è prevalentemente il Piemonte (circa il 38% degli intervistati). Il grado di scolarizzazione del campione è complessivamente elevato; più dei due terzi dei soggetti possiede una laurea di primo o di secondo livello.

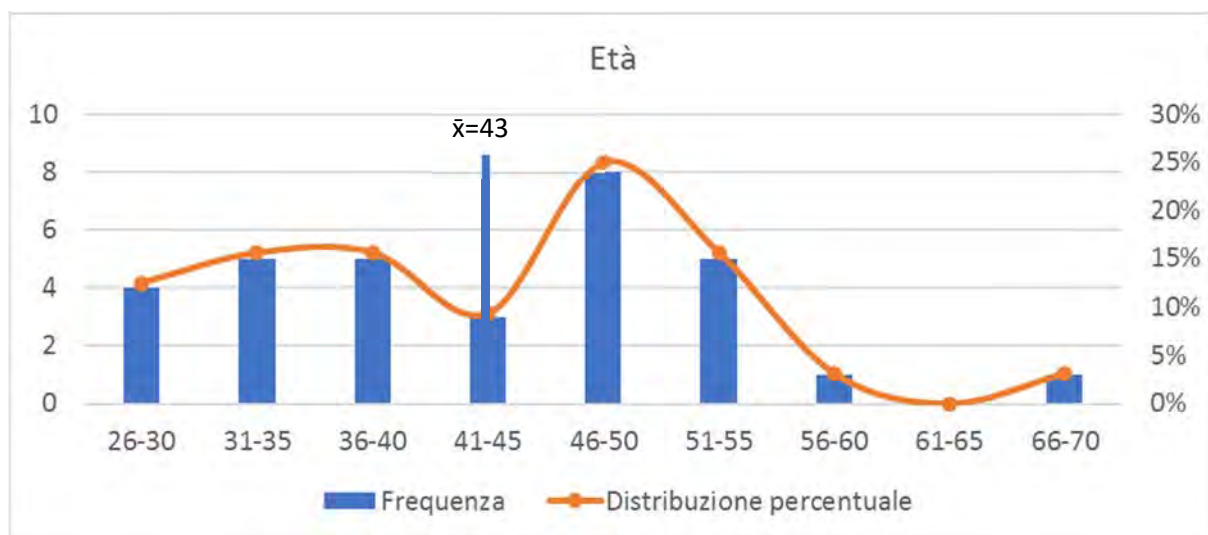


Grafico 3.1: Età anagrafica per classi d'età dei soggetti intervistati; il grafico illustra media e frequenza di ogni classe. Le classi sono state ottenute suddividendo i dati in un range di 5 anni per ciascuna classe. La curva arancione mostra la distribuzione percentuale di ogni classe rispetto alla popolazione analizzata.

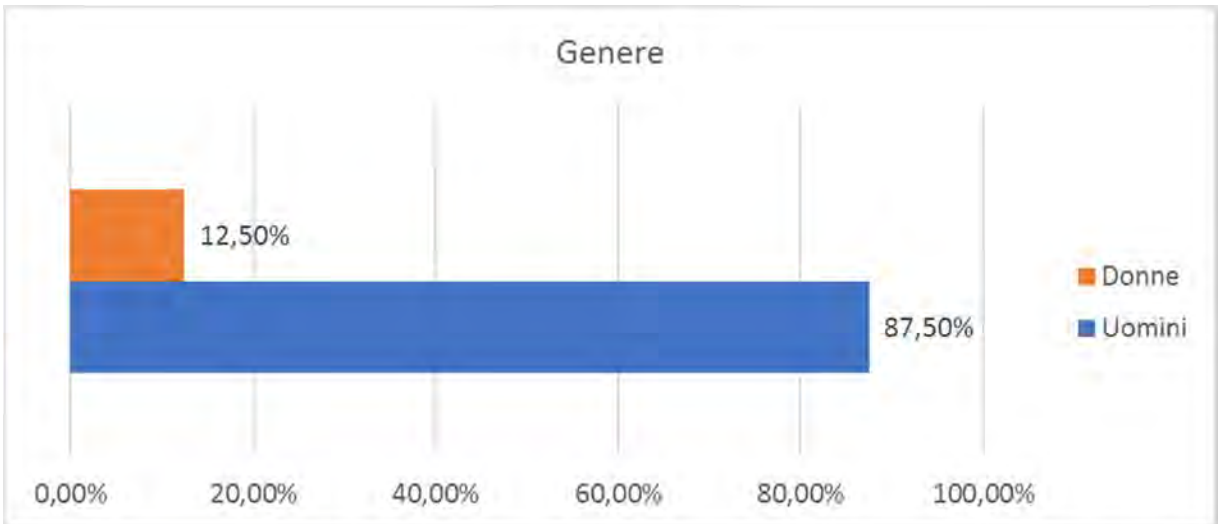


Grafico 3.2: Sesso dei soggetti intervistati.

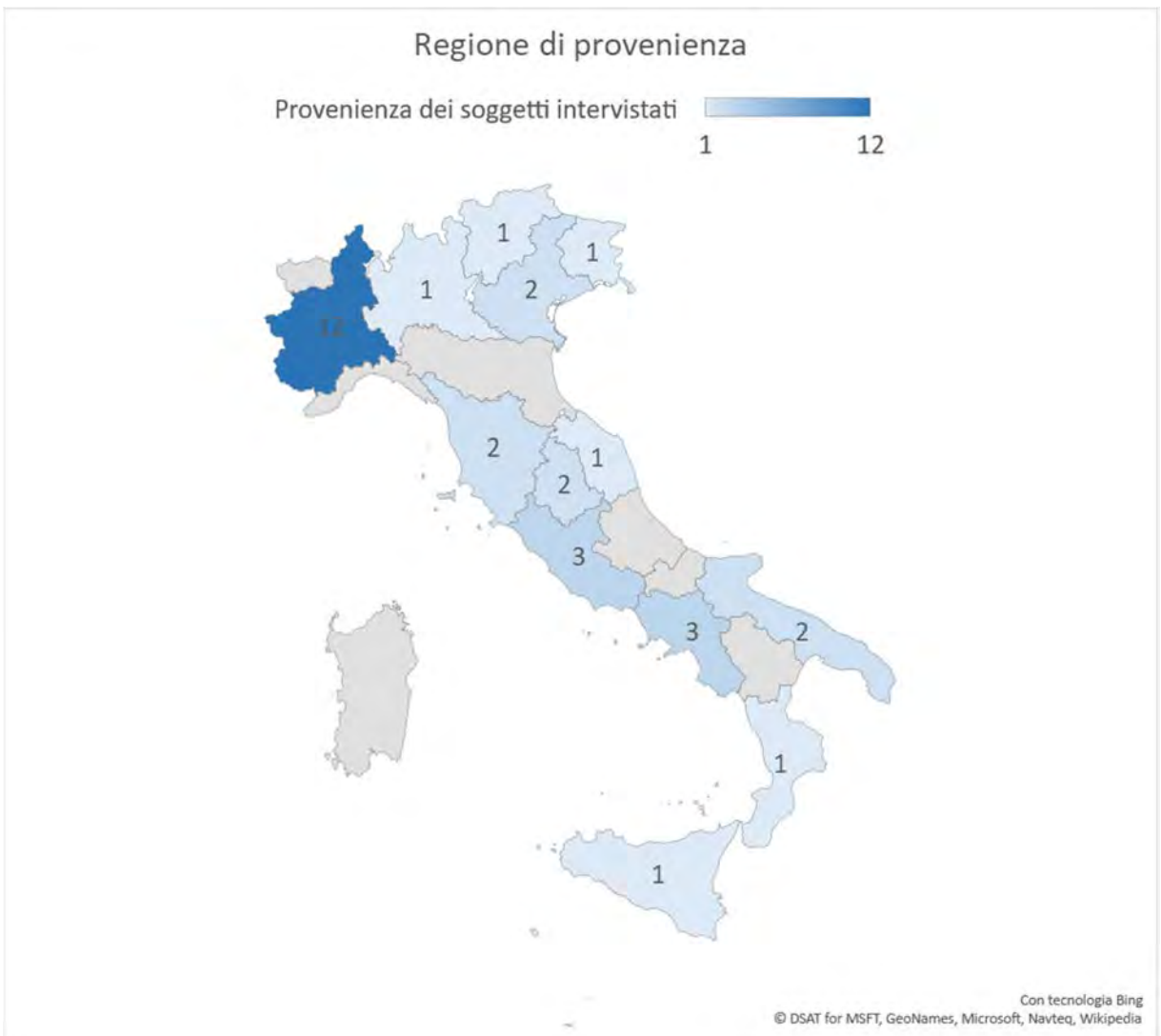


Grafico 3.3: Regione di provenienza dei soggetti intervistati. Tutti i soggetti intervistati sono di nazionalità Italiana.



Grafico 3.4: Il grafico illustra tramite valori percentuali il titolo di studio più alto conseguito dai soggetti intervistati.

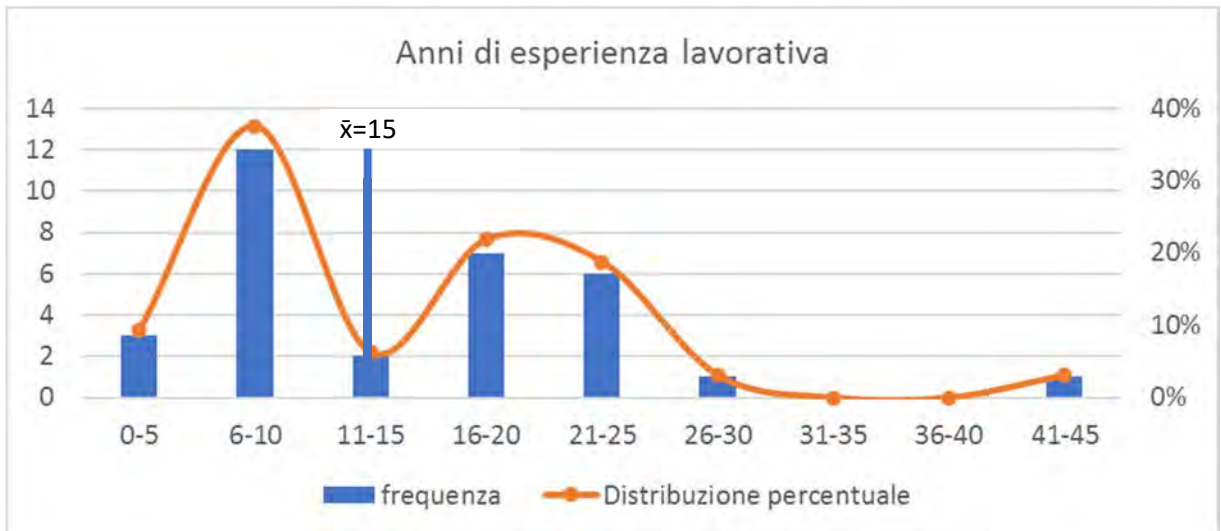


Grafico 3.5: Anni di esperienza lavorativa per classi dei soggetti intervistati; il grafico illustra media e frequenza di ogni classe. La curva arancione mostra la distribuzione percentuale di ogni classe rispetto alla popolazione analizzata.

La totalità del campione conosce la tecnologia UAV; solamente il 6% circa non ha mai visto un drone in azione (in video o dal vivo). I seguenti grafici illustrano in dettaglio le caratteristiche della popolazione intervistata.

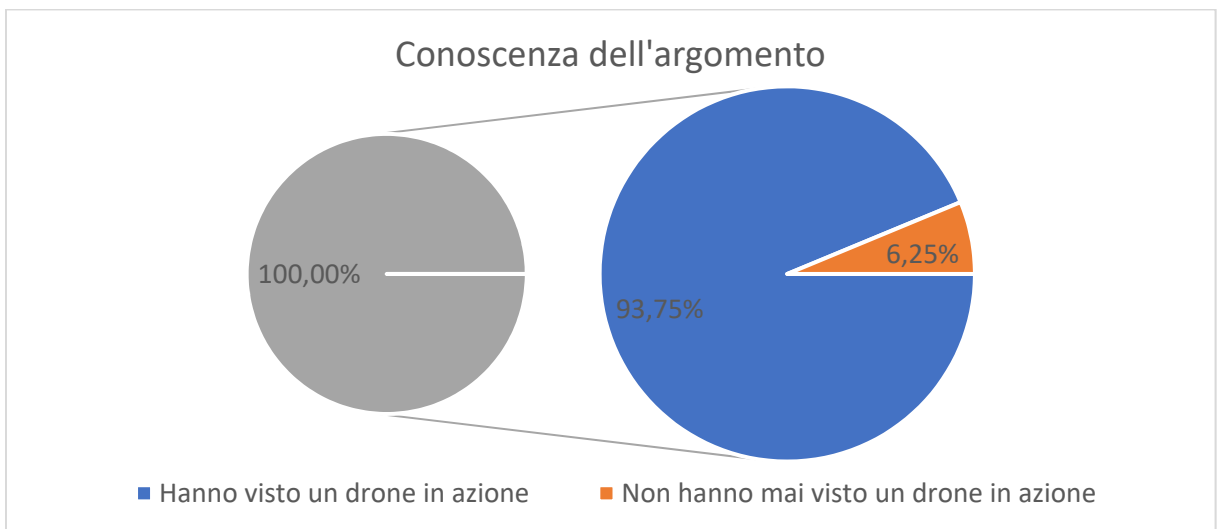


Grafico 3.6: Il 100% del campione ha affermato di conoscere la tecnologia UAV, il grafico mostra la percentuale di soggetti intervistati che ha osservato (dal vivo o in filmato) un drone in azione.

3.3.2 Analisi delle risposte

In questa parte del questionario sono state utilizzate alcune domande precedentemente selezionate dalla letteratura in materia. Le prime 16 domande riguardano situazioni pericolose che potrebbero essere migliorate dall'utilizzo dei droni. Le risposte si basano su una scala likert a 6 punti. Ai soggetti è stato chiesto con che efficienza e con quale frequenza verrebbero da loro utilizzati i droni per le differenti situazioni proposte (Tabella 3.2). È emerso che le tre situazioni di pericolo indicate più idonee all'utilizzo del drone sono state “Condurre sopralluoghi a seguito di incidenti”, “Utilizzare veicoli con braccio in prossimità di linee elettriche sopraelevate” e “Controlli di movimentazioni a rischio”. Le situazioni che invece emergono esser poco idonee per l'utilizzo del drone, sono quelle che richiedono un'analisi approfondita da parte del safety manager, come nel caso di “Verifica delle protezioni dei macchinari”, “Uso appropriato dei dispositivi di bloccaggio di sicurezza” e “Controllo dei requisiti di ergonomia”. In queste risposte si rileva come il campione italiano, a differenza di quello statunitense, sia molto più interessato al controllo delle movimentazioni a rischio, e molto meno interessato ai lavori in prossimità di veicoli con braccio o di gru.

Tabella 3.2: Fattori di efficacia, frequenza e importanza nell'uso di SAPR per migliorare il monitoraggio della sicurezza e le prassi di controllo nel cantiere. Il valore di riferimento è l'Indice di Importanza Relativa ottenuto dividendo il punteggio medio per il valore massimo di riferimento.

Attività	IIR IT	IIR US	Δ IT-US
Condurre sopralluoghi a seguito di incidenti	0.67	0.62	↔ 3
Utilizzare veicoli con braccio in prossimità di linee elettriche sopraelevate	0.62	0.62	↔ 3
Controllo di movimentazioni a rischio	0.60	0.44	↑ 10
Lavori vicino cigli non protetti	0.59	0.67	→ -2
Lavori in punti ciechi di macchinari pesanti	0.59	0.65	→ -2
Verifiche sull'utilizzo idoneo di dispositivi anticaduta	0.58	0.60	→ 1
Ispezioni sul livello di pulizia	0.57	0.61	→ -1
Lavori in prossimità di materiali pericolosi	0.57	0.57	→ 0
Lavori in trincee non protette	0.56	0.57	→ 0
Ispezioni sull'utilizzo idoneo dei DPI	0.55	0.55	→ 0
Lavori in prossimità di veicoli con braccio o di gru	0.53	0.67	↓ -10
Ispezioni su idoneità di scale e ponteggi	0.53	0.52	→ 0
Ispezioni su accessi a zone ad accesso limitato	0.49	0.52	→ -2
Verifica delle protezioni dei macchinari	0.45	0.40	→ 0
Uso appropriato dei dispositivi di bloccaggio di sicurezza (tag out/lock out)	0.39	0.29	→ 1
Controllo dei requisiti di ergonomia	0.38	0.35	→ -1

Per un'analisi tecnica, sono state selezionate 16 funzionalità che il drone dovrebbe idealmente avere per effettuare operazioni finalizzate al controllo delle condizioni di sicurezza (Tabella 3.3). È emerso che le tre caratteristiche tecniche più richieste dai soggetti intervistati sono state “Capacità di mappatura ad alta risoluzione”, “Alta precisione nella navigazione al chiuso” e “Interfaccia semplice e interattiva”. L'importanza della rilevazione e dell'evitamento automatico di ostacoli renderebbe il drone impiegabile in ambienti al chiuso, o in caso vengano manovrati dei carichi sospesi, i quali potrebbero entrare in collisione con il drone. Le tre caratteristiche tecniche meno richieste sono state la possibilità di usufruire di streaming audio in diretta, la compatibilità con altri dispositivi mobili e l'utilizzo di un braccio meccanico manipolatore o effettore.

Tabella 3.3: Importanza di alcune funzioni tecniche dei SAPR per migliorare il monitoraggio della sicurezza e le prassi di controllo nel cantiere.

Strumentazione o funzionalità	IIR	IIR	Δ
	IT	US	IT-US
Capacità di mappatura ad alta risoluzione	0.90	0.71	↑ 12
Alta precisione nella navigazione al chiuso	0.87	0.73	↑ 10
Interfaccia semplice e interattiva	0.86	0.83	↑ 4
Rilevazione ed evitamento di ostacoli	0.85	0.88	↔ -1
Accuratezza della videocamera	0.84	0.87	↔ 0
Streaming video in diretta	0.84	0.90	↓ -6
Portabilità	0.84	0.82	↔ 2
Alta precisione nella navigazione all'aperto	0.83	0.89	↓ -6
Robustezza e durabilità	0.82	0.88	↓ -5
Sensori termografici	0.81	0.62	↑ 6
Rilevatori di movimento	0.80	0.68	↔ 3
Decollo e atterraggio automatici	0.79	0.79	↔ -3
Sorvolo automatico	0.75	0.75	↔ -3
Streaming audio in diretta	0.75	0.75	↔ -3
Compatibilità con altri dispositivi mobili	0.72	0.85	↓ -9
Manipolatore o effettore	0.68	0.63	↔ -1

I soggetti intervistati hanno anche fornito informazioni su alcune variabili (altezze, distanze, tempi e luoghi) con cui utilizzerebbero un ipotetico drone a loro fornito per svolgere il loro compito di safety surveying (Tabella 3.4). I risultati dimostrano che l'altezza d'impiego preferita sarebbe inferiore ai 30 metri, che il tempo di volo ideale sarebbe compreso tra i 30 e i 60 minuti, che la distanza tra il drone e l'operatore durante il sorvolo sarebbe inferiore a 150

metri e che i voli potrebbero essere utilizzati per raggiungere posti altrimenti inaccessibili. I parametri rilevati soddisferebbero lo scenario normativo italiano ad oggi vigente; inoltre a differenza del campione statunitense, i safety managers italiani preferirebbero effettuare dei voli ad altezza leggermente inferiore, ma con una durata leggermente più elevata.

Tabella 3.4: Frequenza di sorvolo di un ideale SAPR ad altezze, distanze, tempi e luoghi differenti per condurre operazioni legate alla sicurezza.

Altezza	IIR IT	IIR US	Δ IT-US
Altezza < 30 m	0.73	0.78	👉1
30 m < Altezza < 60 m	0.70	0.80	👉-1
60 m < Altezza < 120 m	0.58	0.67	👉0
120 m < Altezza	0.48	0.49	👉0

Distanza	IIR IT	IIR US	Δ IT-US
Distanza < 150 m	0.67	0.78	👉0
150 m < Distanza < 1.5 km	0.67	0.63	👉0
1.5 km < Distanza < 8 km	0.57	0.39	👉0
8 km < Distanza	0.48	0.38	👉0

Tempo	IIR IT	IIR US	Δ IT-US
Tempo < 30 min.	0.72	0.80	👉-1
30 min. < Tempo < 1 ora	0.74	0.72	👉1
1 ora < Tempo < 2 ore	0.61	0.52	👉0
2 ore < Tempo	0.54	0.45	👉0

Luogo	IIR IT	IIR US	Δ IT-US
Posti inaccessibili	0.88	0.80	👉1
Ambiente interno	0.67	0.40	👉0
Ambiente esterno	0.83	0.96	👉-1

Infine sono stati analizzati 25 items che solitamente vengono verificati in una ordinaria safety checklist, dividendoli in 3 categorie in base alla distanza da cui vengono catturate le immagini (Tabella 3.5). Dall'analisi effettuata gli elementi più importanti risultano essere le condizioni di attrezzatura, materiale e viabilità, la recinzione perimetrale e il controllo del deterioramento per la prima categoria (Overview). Per quanto riguarda la categoria a medio raggio risultano elementi importanti i lavoratori protetti da caduta, le reti e le tavole di sicurezza, le rampe e le piste protette da guardrail e libere da ostruzioni. Infine per l'ispezione a corto raggio le protezioni da caduta dei carichi sospesi, la piattaforma di lavoro aerea mobile elevabile con protezioni anticaduta e l'isolamento dell'area di azione della gru durante la manovra di carichi sospesi emergono con un indice di importanza relativa elevato. In questa ultima parte del sondaggio i soggetti sembrano prediligere una particolare attenzione verso il rischio di caduta dall'alto, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni a medio e corto raggio. Questo trova riscontro nel fatto che statisticamente la caduta dall'alto è la prima causa di infortunio mortale in edilizia. Il drone potrebbe essere pertanto utilizzato per contrastare tale criticità.

Tabella 3.5: Indice di importanza relativa per i compiti di ispezione sulla sicurezza da UAV.

Lungo raggio	IIR	IIR	Δ
	IT	BR	IT-BR
Condizioni di attrezzatura, materiale e viabilità	0.71	0.83	↔ 1
Recinzione perimetrale	0.69	0.85	↘ -1
Controllo del deterioramento	0.69	0.73	↔ 3
Parcheggi e vie d'emergenza	0.66	0.75	↔ 1
Deposito materiali	0.64	0.78	↘ -1
Area preassemblaggio armature e casseformi	0.62	0.82	↘ -3
Cassoni dei rifiuti	0.59	0.73	↔ 0
Medio raggio	IIR	IIR	Δ
	IT	BR	IT-BR
Lavoratori protetti da caduta	0.78	0.87	↔ 0
Reti e tavole di sicurezza	0.72	0.85	↔ 0
Rampe e piste protette da guardrails e libere da ostruzioni	0.68	0.85	↔ 0
Operatori con DPI	0.68	0.75	↔ 0
Rifiuti rimossi con scivoli	0.62	0.73	↔ 0
Corto raggio	IIR	IIR	Δ
	IT	BR	IT-BR
Protezione da caduta dei carichi sospesi	0.70	0.78	↑ 6
Piattaforma di lavoro aerea o cestello con protezioni anti caduta	0.69	0.87	↘ -1
Isolamento dell'area di azione della gru durante la manovra di carichi sospesi	0.67	0.72	↑ 8
Armature in acciaio scoperte	0.67	0.87	↘ -2
Montaggio e smontaggio cassetture	0.66	0.85	↘ -2
Ponteggi "a piombo" e dotati di controventatura	0.65	0.82	↘ -1
Pulizia dell'area di lavoro	0.64	0.78	↔ 1
Area di rifornimento e manutenzione dell'attrezzatura	0.59	0.83	↓ -4
Mezzi pesanti	0.59	0.72	↔ 3
Stalli per sabbia e ghiaia vicini a betoniera e argano	0.57	0.78	↘ -1
Segnaletica per zona di carico e scarico	0.57	0.80	↓ -5
Stock di materiali vicini alla gru o all'argano	0.56	0.75	↘ -2
Stock di materiali protetti dalla pioggia	0.56	0.67	↔ 0

4. Caso studio I – Un cantiere edile ordinario: approccio fotogrammetrico e cartografico per la valutazione dei rischi intrinseci e ambientali

Il presente studio si sviluppa nell'ambito delle attività dello stage a Ferrere e Bersezio (alta Valle Stura - CN) condotte dal team DIRECT del Politecnico di Torino nel settembre 2016. Le attività svolte durante lo stage comprendevano oltre al rilievo della borgata di Ferrere e della relativa valle, il rilievo fotogrammetrico UAV del cantiere della struttura non ultimata a Bersezio, oggetto del caso studio affrontato in questo capitolo. La struttura fa parte di un progetto che negli anni '70 avrebbe dovuto rilanciare l'importanza della località all'interno delle Alpi Marittime, trattandosi del cantiere di una struttura ricettiva, funzionale al turismo montano e al vicino skilift.

La scelta di questo caso studio è il seguito di considerazioni e vincoli imposti dalla vigente normativa. Il regolamento ENAC infatti vieta il sorvolo di luoghi abitati o di assembramenti di persone, e un esperimento simile in un cantiere attivo sarebbe stato di difficile realizzazione, sia a causa della presenza dei lavoratori in sito, che per l'esigenza di dover richiedere dei permessi speciali per condurre l'operazione come attività critica. Trattandosi invece di un cantiere fermo, in cui cioè non sono in atto lavorazioni, è stato possibile procedere all'acquisizione dei dati ricadendo nella sfera delle attività non critiche.

Preso atto dell'estrema delicatezza del tema trattato, avendo lo stesso ricadute penali in caso di accertamento di irregolarità da parte dell'autorità giudiziaria competente, il presente caso studio comporta il vantaggio di condurre questa ricerca liberamente, senza pertanto contravvenire alle logiche d'impresa di chi gestisce un cantiere edile attivo.

In questo capitolo verranno inizialmente introdotti i fondamenti teorici della fotogrammetria terrestre e aerea, con particolare riferimento alla fotogrammetria da drone; verranno quindi illustrate le procedure di raccolta, elaborazione e analisi dei dati nell'ambito del caso studio selezionato. Infine verrà proposto un workflow operativo che analizza e individua tutti i fattori di rischio connessi al sito, ossia le condizioni del contesto potenzialmente interferenti con l'esecuzione dei lavori in sicurezza.

4.1 La Fotogrammetria

Per rilevare un oggetto architettonico di qualsiasi forma e dimensione, è necessario un elevato numero di punti, al fine di poter descrivere la sua forma in maniera completa. Per la produzione di cartografia mediante la raccolta di informazioni da immagini aeree e satellitari, ma anche per il rilevamento di oggetti difficilmente o del tutto inaccessibili, la Geomatica fornisce strumenti e tecniche che permettono di acquisire queste informazioni in modo efficace, rapido ed economico; una di queste tecniche è la fotogrammetria (Spanò & Chiabrando, 2016).

4.1.1 Principi generali della fotogrammetria

“La fotogrammetria è la scienza che consente di **ottenere informazioni** affidabili di oggetti fisici e dell’ambiente circostante mediante processi di **registrazione, misura e interpretazione** delle immagini fotografiche e digitali formate dall’energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici.” (American Society of Photogrammetry, 1980).

Il supporto sul quale acquisiamo informazioni utilizzando una macchina fotografica costituisce una proiezione piana dello spazio che ci circonda, nota col nome di **fotogramma**. Dato un punto su un fotogramma non siamo in grado di ricavare le posizioni di quel punto nello spazio, ma solo una **direzione**; se vogliamo che l’insieme di pixel possano condurci a una realtà tridimensionale, ciò non è possibile con una singola immagine e serve la ripresa dell’oggetto **da almeno due punti di vista differenti**; più immagini si hanno, più potrò stimare la forma dell’oggetto nel miglior modo possibile.

Lo schema seguente (Figura 4.1) permette di comprendere meglio il funzionamento.

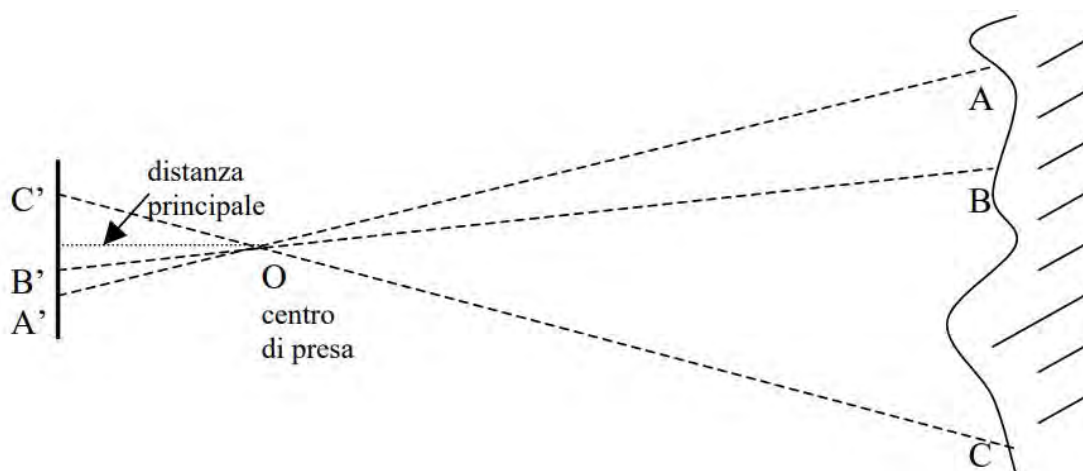


Figura 4.1: Geometria della presa fotogrammetrica (Fonte: <http://people.dicea.unifi.it/fausto.sacerdote/>).

La base della piramide piccola è un sensore che acquisisce le informazioni radiometriche generando l'immagine; i punti registrati sul sensore si chiamano **punti immagine** ($A' B' C'$), il vertice della piramide viene chiamato **centro di presa** (O), dove sono convogliati tutti i punti che provengono dall'oggetto, chiamati di conseguenza **punti oggetto** ($A B C$). Questi elementi sono allineati da raggi visuali che, entrando nella camera e passando dal centro di presa, vanno a colpire un particolare punto del sensore; l'energia luminosa viene registrata con un numero. L'insieme di queste informazioni genera la scena ripresa.

Avendo due o più immagini dello stesso oggetto, posso disporle nello spazio in posizione corretta, e con una corretta angolazione. Riproiettando il punto immagine verso lo spazio oggetto, troverò il raggio oggetto dove si intersecano i **raggi omologhi** (raggi che interessano lo stesso punto immagine) l'operazione può essere vista sia in fase di acquisizione delle immagini che in fase di ricostruzione tridimensionali dell'oggetto. La scienza fotogrammetrica si basa su questi semplici principi (Figura 4.2).

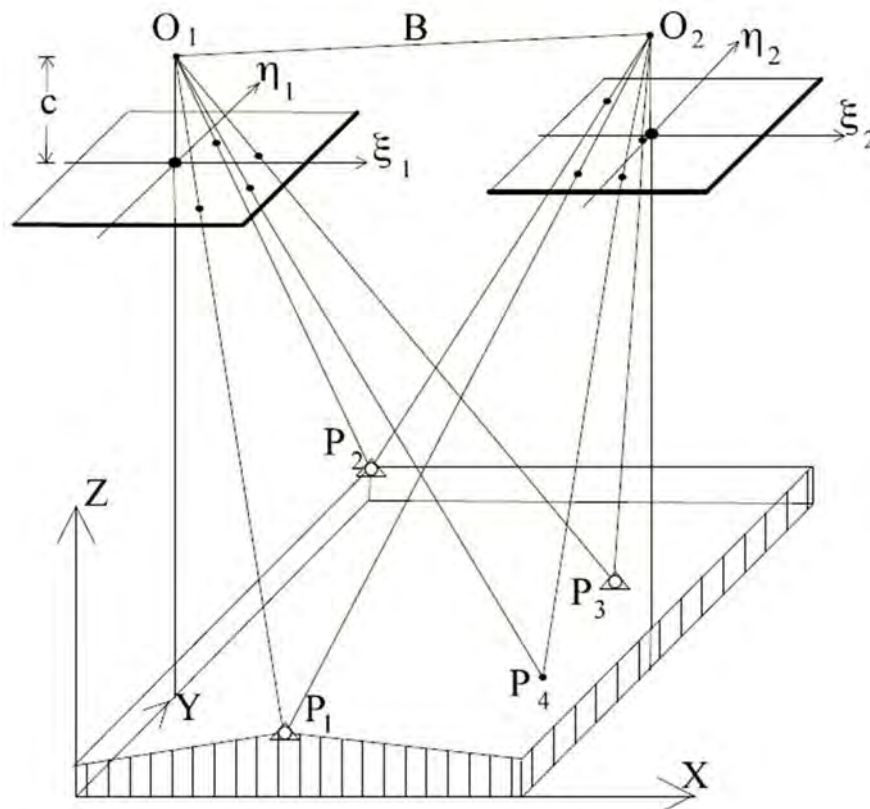


Figura 4.2: Considerando due fotografie che riprendono uno stesso oggetto, i raggi delle stelle proiettive che passano per le immagini di uno stesso punto (immagini omologhe) si intersecano nello spazio. L'insieme dei punti di intersezione delle infinite coppie di raggi omologhi si chiama modello stereoscopico (Kraus, 1998).

Per ottenere le coordinate spaziali dei punti oggetto sono necessarie, come abbiamo già detto, almeno due immagini dell'oggetto da rilevare, scattate da posizioni differenti. La posizione parallela delle camere (solitamente questa è la posizione in aerofotogrammetria) è simile alla visione stereoscopica umana ed è indicata per ottenere risultati bidimensionali; la posizione convergente invece spesso permette di ottenere una precisione maggiore nella direzione della profondità (Figura 4.3).

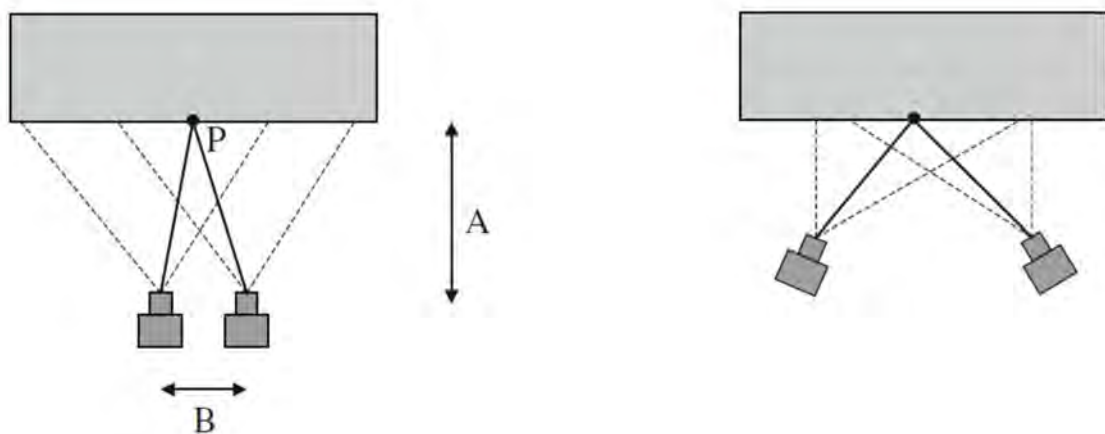


Figura 4.3: Camere in posizione parallela (a sinistra) e convergente (a destra). A è la distanza tra le camere e l'oggetto e B è la distanza relativa tra due singole camere. Per aumentare l'area di sovrapposizione si possono posizionare le camere in maniera convergente (Linder, 2016).

La prima fase del processo fotogrammetrico è quella dell'acquisizione delle immagini, questo può avvenire tramite fotogrammetria terrestre, aerea o da drone.

Successivamente si procede all'orientamento delle immagini, un'operazione che permette di stimare la posizione delle immagini nello spazio e i parametri di calibrazione; questa operazione viene fatta per mezzo di alcuni punti individuati nelle immagini chiamati punti omologhi (o keypoints), che vanno a popolare la **sparse cloud**.

Una volta determinata la posizione corretta delle immagini e il loro assetto nello spazio, posso individuare in modo massivo altri punti oggetto, generando la **dense cloud**, che descrive in modo compiuto e completo l'oggetto ripreso.

Dopo aver ricostruito per punti l'oggetto posso generarne diverse restituzioni grafiche, generare la sua superficie, riproiettare su questa superficie le varie immagini (**texturizzazione**) o ottenere una restituzione fotorealistica dell'oggetto per mezzo di un **modello 3D**.

4.1.2 Acquisizione delle immagini per mezzo di aerei

Le tecniche di telerilevamento e fotogrammetria sono andate sempre più sovrapponendosi negli ultimi anni, grazie anche alla disponibilità di sensori misti sui satelliti, piuttosto che multispettrali da aereo.

In ambito di riprese aeree, le camere sono costituite dalle riprese che l'aereo acquisisce durante la strisciata (Figura 4.4). È necessario che, per ogni punto del terreno che si intende rilevare, ci sia almeno una coppia di immagini che, sovrapponendosi, inquadra quel punto. La zona ricoperta dalle due immagini (overlapping) è la zona che io potrò restituire, in quanto ha una sovrapposizione tale per cui tutti i punti in essa contenuti sono visibili in almeno due immagini.

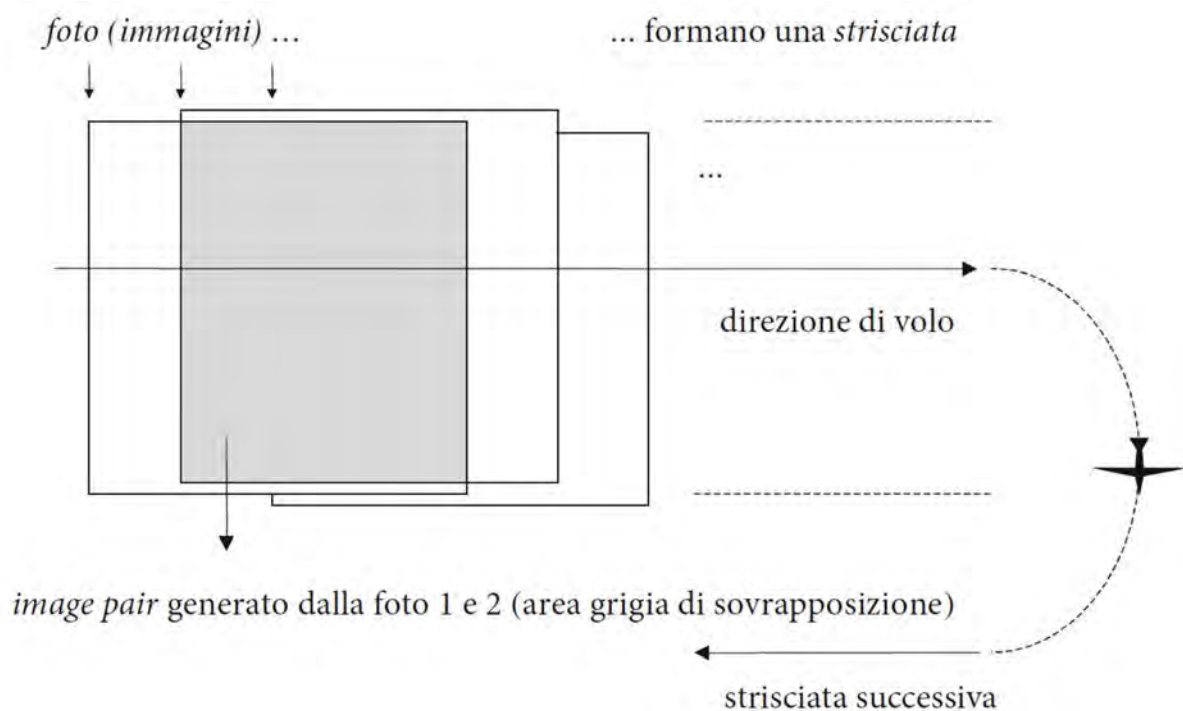


Figura 4.4: Schema di una strisciata aerea (Linder, 2016).

Quando si pianifica il volo Bisogna verificare che i ricoprimenti avvengano sia in maniera longitudinale che trasversale. Una buona prassi operativa indica per il ricoprimento longitudinale una sovrapposizione del 55-60 % e per il ricoprimento trasversale del 10-20% (Figura 4.5).

La distanza tra i due centri di presa, riportata al suolo, è indicata con la lettera "b" ed è chiamata **base di presa**. La base di presa può essere tradotta in un intervallo di scatto in secondi, che mi permetterà di ottenere il ricoprimento voluto in fase della pianificazione del volo.



Figura 4.5: Schema di una strisciata aerea. L'overlapping (sovrapposizione) in questo caso è del 60% (Fonte: Catalogo illustrativo Carl Zeiss, 1976).

È importante sottostare a un rapporto tra la scala dell'immagine acquisita e scala finale della carta desiderata; si può comunque affermare che la scala delle immagini deve essere 5-6 volte maggiore rispetto alla scala della rappresentazione finale (ad esempio per rappresentare una carta in scala 1:1000, una buona scala dell'immagine di partenza potrà essere 1:6000). Questo perché andrò a ragionare su dimensioni che sono quelle del pixel, ben più piccole di quello che sarà il tratto sulla carta.

Il rapporto di scala entra in gioco anche sul singolo pixel, quando lo stesso si riproietta sul terreno; la dimensione a terra del pixel (Ground Sampling Distance, GSD) è la dimensione minima dell'informazione che posso prendere dal terreno e acquisire dal sensore, che è indice della risoluzione del rilievo, necessariamente legata alla sua precisione (Più è piccolo il GSD più sarà preciso il rilievo). La precisione planimetrica è spesso stimata in relazione alla GSD, un rilievo di buona qualità presenta errori prossimi alla metà del GSD.



La precisione della terza dimensione dell'oggetto è quella più critica; nel caso del rilievo aereo è legata alla quota, è favorita da focali lunghe e sfavorita da distanze elevate tra le foto e GSD elevato.

4.1.3 Acquisizione delle immagini per mezzo di droni

I droni sono veicoli aerei motorizzati riutilizzabili senza pilota. I vantaggi rispetto alla fotogrammetria aerea sono il costo, la possibilità di condurre missioni autonome, la non necessità di disporre di un pilota a bordo e l'alta manovrabilità dei dispositivi rispetto agli aeromobili convenzionali. Gli svantaggi sono il limite di peso e di payload, che si traducono in un limite di durata e nell'impiego di sensori di minor qualità.

La scelta del drone è influenzata da alcuni parametri, tra cui i più importanti sono il costo, le dimensioni, la qualità del sensore, la capacità di payload, l'autonomia e l'area di copertura per missione. Distinguiamo due grandi categorie di droni impiegati per scopi fotogrammetrici, i droni multirotores e i droni ad ala fissa (Tabella 4.1).

Tabella 4.1: Parametri che caratterizzano i droni multirotores e i droni ad ala fissa.

	Multirotores	Ala fissa
		
Vantaggi	Sistema aperto (aggiunta sensori diversi nel gimbal)	Autonomia (~50 min)
	Payload maggiore	Maggiore quota di volo
	Area atterraggio minima	Maggiore copertura
	Prese inclinate e ravvicinate	Sicurezza
Svantaggi	Autonomia (~15-30 min)	Payload minore
	Minore copertura	Dataset grandi
	Minore quota di volo	Area atterraggio ampia
	Sicurezza	Sistema Chiuso (posso usare un solo sensore)
Ambiti	Rilievi da 1 a 10 ha	Rilievi da 1 a 10 km ²
	Rilievo di dettaglio	Rilievo cartografico
	Rilievo dell'architettura	Agricoltura di precisione

Il drone deve essere dotato di un sistema di navigazione di alta precisione, quasi sempre costituito da una centralina (micro antenne GPS, accelerometro, bussola, giroscopio, barometro) dove rientrano diversi dati che danno informazioni ai rotori per far muovere il drone in maniera coerente con i comandi impartiti. I sistemi giroscopici permettono al mezzo di stare sempre in maniera orizzontale e gestiscono anche l'assetto del gimbal (il "cestello" che sorregge il sensore).

Solitamente le antenne GPS acquisiscono sia il dato di codice che il dato di fase, e va bene nell'ambito della navigazione con una precisione al metro. Il GPS non è in grado di fornire la precisione altimetrica in maniera precisa, per questo viene utilizzato un barometro che misura la differenza di pressione rispetto alla misura registrata in fase di decollo.

Alcuni sistemi hanno un sensore di prossimità che viene associato a un sistema di sicurezza anticollisione, questo permette al drone di variare la propria rotta in caso di impatto imminente.

I sensori possono acquisire immagini RGB (Red Green Blue) oppure acquisire nell'ambito dell'infrarosso, multispettrale, termico oppure è possibile installare dei sistemi LIDAR, che in questo caso implementano la stessa tecnologia già vista nei sistemi di scansione 3D terrestre. Questi sensori sono molto costosi e solitamente costano molto più del drone (decine di migliaia di Euro) e costituiscono un payload importante per il drone.

Come già visto per la fotogrammetria aerea, è importante pianificare il volo con un opportuno sistema di navigazione, che permette di acquisire immagini ad un dato intervallo temporale in funzione della velocità del velivolo, e di prevedere un numero di missioni dipendente anche dalla sua autonomia.

4.1.4 Orientamento

Se si vogliono perseguire scopi geometrici, dopo aver acquisito le immagini con i mezzi precedentemente illustrati, le stesse devono essere orientate nello spazio in maniera da sottostare alle equazioni di collinearità; è necessario cioè stabilire l'**orientamento interno** e l'**orientamento esterno**.

Conoscenza di orientamento esterno e interno della camera sono i parametri necessari per la corretta ricostruzione fotogrammetrica. Per ogni punto osservato ho una coppia di equazioni di collinearità; conoscendo le coordinate dei punti sulle immagini, posso risalire in maniera automatica ai parametri di orientamento mediante i raggi omologhi. Conseguentemente potranno essere determinate le coordinate del punto oggetto.

La calibrazione può essere fatta in laboratorio, ma a causa alle variazioni di temperatura durante la raccolta dei dati e delle moderne ottiche con sensori a lunghezza focale variabile, è il software di fotogrammetria che va a generare i parametri di calibrazione del sensore, per ogni volta che viene fatta una ripresa.

4.1.4.1 Parametri interni di calibrazione

L'allineamento avviene sotto determinate condizioni geometriche; devo sapere dove si trova il punto di presa (O) rispetto all'immagine; solitamente si trova a una distanza pari alla distanza focale (c). Il centro di proiezione (O) si proietta teoricamente solitamente sul pixel centrale dell'immagine (FC), ma praticamente dobbiamo conoscere lo scostamento tra il centro di proiezione effettivo (PP) e il centro fiduciale dell'immagine, che non sempre corrispondono a causa della deviazione dovuta alla distorsione dell'obiettivo. Questo determina la conoscenza dell'orientamento interno della fotocamera, ovvero i parametri che entrano in gioco quando il fotone entra nella camera e va a stamparsi sul sensore (Figura 4.6).

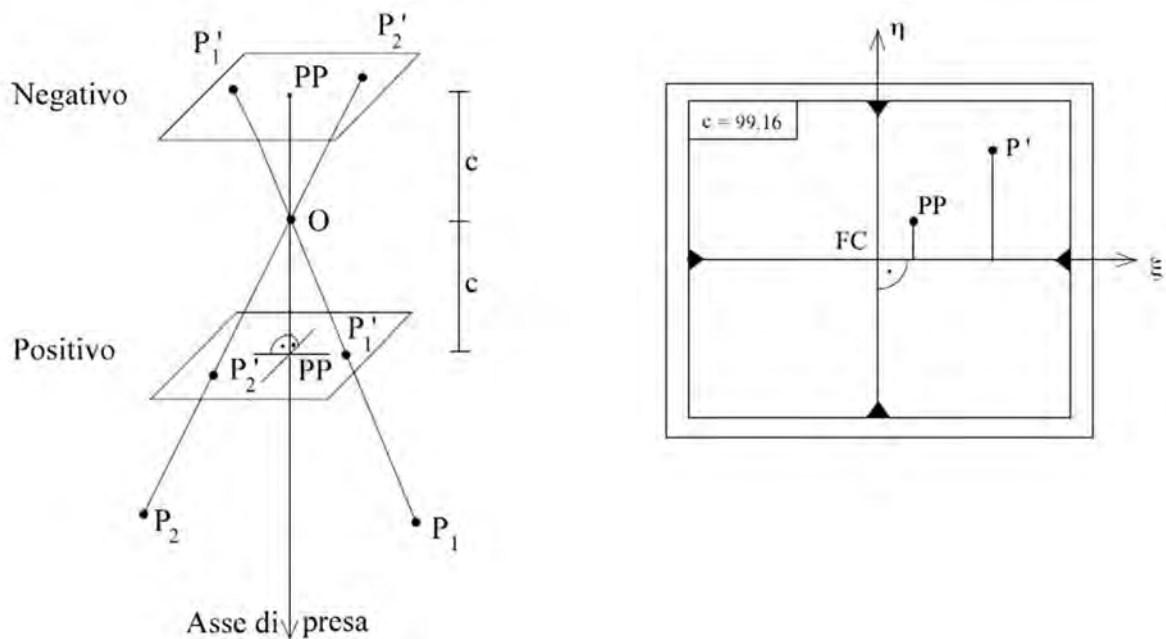


Figura 4.6: L'orientamento interno è l'insieme dei parametri utili a definire la geometria interna della camera da presa. I parametri dell'orientamento interno sono: le coordinate del punto principale (PP) nel sistema fiduciale e la distanza principale (c) della camera; essi definiscono la posizione del centro di proiezione (PP) rispetto al sistema fiduciale definito sul piano del fotogramma (Kraus, 1998).

4.1.4.2 Parametri esterni di calibrazione

Il centro di proiezione PP ha coordinate XYZ e la camera sarà orientata secondo 3 angoli chiamati angoli di assetto; la conoscenza di questi 6 parametri determina la conoscenza dell'orientamento esterno. La terna cartesiana legata all'obiettivo della presa si troverà infatti ruotata rispetto alla terna cartesiana che fa riferimento al sistema del rilievo (Figura 4.7).

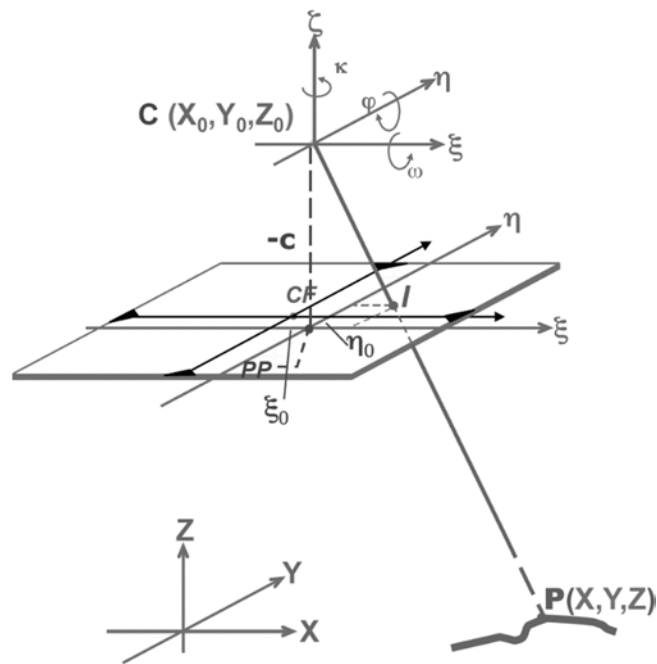


Figura 4.7: L'orientamento esterno è l'insieme dei parametri utili alla definizione dell'assetto spaziale della camera rispetto ad un sistema di coordinate tridimensionale. Essenzialmente definisce la posizione spaziale di un corpo rigido nello spazio. Quindi è definito da 6 parametri: 3 traslazioni e 3 rotazioni (Spanò & Chiabrando, 2016).

A tale scopo è necessario disporre di alcuni GCPs (Ground Control Points, o **punti noti**) che solitamente si acquisiscono con tecniche topografiche di rilievo mediante rover GPS. Questi punti permetteranno di orientare le varie camere nel sistema di riferimento solidale all'oggetto rilevato. L'identificazione dei GCPs permetterà ai moderni software di ottenere, tramite la geometria epipolare (la geometria della visione stereoscopica, che descrive le relazioni e i vincoli geometrici che legano due immagini 2D della stessa scena 3D), l'orientamento esterno di ogni singola camera, i parametri di orientamento interno (valevoli per tutte le camere) e le coordinate di tutti i punti omologhi trovate tra le varie immagini. Il risultato di questo processo permetterà di descrivere il mio oggetto come una nuvola di punti, chiamata **sparse cloud**.

4.1.4.3 Ground Control Points e Real Time Kinematics

I GCPs (Ground Control Points) sono dei punti le cui coordinate sono note, e sono fondamentali per aumentare l'accuratezza assoluta del progetto.

Lo scopo dei GCPs è quello di georiferire correttamente le immagini acquisite e scalare accuratamente il modello in seguito generato sui tre assi cartesiani.

Senza GCPs un progetto potrebbe avere un errore medio dell'1%. Nella grande scala (fotogrammetria degli oggetti vicini) questo errore è accettabile, ma nella scala territoriale ciò corrisponde ad errori di un ordine di grandezza inaccettabile (metro o decine di metri). Utilizzando i GCPs per scale del rilievo prossime a 1:100-1:200 (che sono tipiche dei progetti di fotogrammetria UAV rivolti a documentare gli edifici) si può arrivare fino ad un'accuratezza di 2-3 cm.

Questo metodo richiede la misurazione, per mezzo di un rover GPS, di numerosi punti sparsi sul sito da rilevare; le condizioni del terreno e le dimensioni stesse del sito sono fattori che aumentano i tempi di misura di questi punti. (Figura 4.8).

I GCPs possono anche essere utilizzati come check points per verificare l'accuratezza del risultato. È importante precisare che gli eventuali check points non saranno utilizzati per il georiferimento del modello, ma solo per fornire un riscontro della qualità del risultato. I residui sui checkpoint permettono infatti di stabilire la qualità del blocco fotogrammetrico, in relazione della scala di rappresentazione degli elaborati di restituzione.

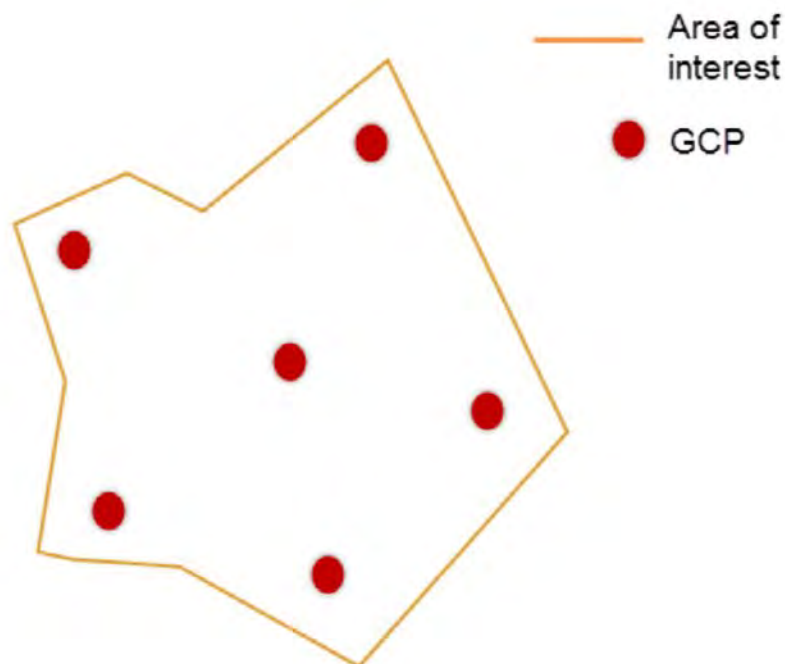


Figura 4.8: Condizione ideale di distribuzione dei GCPs sull'area di interesse (Pix 4D SA, 2017).

È necessario utilizzare target che siano facilmente identificabili nelle fotografie, sia per dimensioni che per cromie, questo perché nelle fasi di elaborazione dei dati sarà necessario ingrandire molto le immagini per collimare i punti a terra (Figura 4.9).



Figura 4.9: Alcuni esempi di target comunemente utilizzati (Fonte: www.verticalspect.com).

La collimazione può essere fatta anche su target ad automatico riconoscimento, ogni software ha il suo tipo di target che vengono riconosciuti in maniera automatica; nei casi aerei, in cui voliamo a una certa distanza dall'oggetto, questi tipi di marker devono essere molto grandi per essere riconosciuti (il target deve essere circa di una trentina di pixel).

In altri casi può essere invece necessario utilizzare alcuni **punti naturali**; tali punti vengono identificati opportunamente sul campo senza l'ausilio dei target precedentemente illustrati, prediligendo punti di facile riconoscimento e su oggetti non in movimento (Figura 4.10).

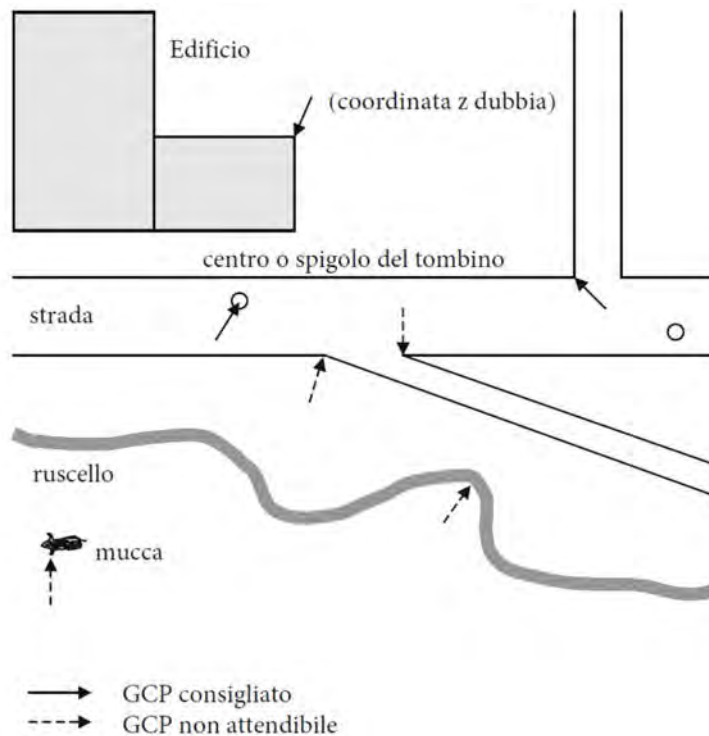


Figura 4.10: Esempio di GCPs naturali consigliati o non attendibili (Linder, 2016).

È necessario, tramite il software fotogrammetrico, collimare sulle foto i vari punti di controllo a terra; è sufficiente collimarne un paio su alcune immagini affinché successivamente il software sia in grado di suggerirci, in maniera ancora approssimata, le posizioni di quel punto sulle varie immagini. Questa operazione è forse l'operazione più significativa in termini di tempo uomo.

A volte il rilievo di GCPs può essere difficoltoso e dispendioso in termini di tempo e di energie; un metodo più avanzato è il metodo RTK (Real Time Kinematics) adottato sul velivolo. Questo metodo sfrutta un drone equipaggiato di una speciale piattaforma GPS e di una base a terra di riferimento.

Il sistema RTK si basa dunque su tre segmenti:

- Una stazione fissa
- Un rover mobile (drone)
- Un canale di comunicazione

Nota l'esatta posizione della stazione, grazie ai dati forniti dai satelliti GPS, viene stabilita la posizione relativa del rover per mezzo del canale di comunicazione. Combinando la posizione rilevata del rover e quella della stazione, è possibile stabilire l'esatta posizione del drone in ogni intervallo temporale.

Questo metodo riduce gli errori di posizionamento, fornendo un preciso **geotag** delle esatte posizioni del drone per ognuna delle immagini scattate (o in ogni istante del video registrato); questo sistema è più speditivo e non richiede il rilievo manuale dei punti a terra. Di contro, questi sistemi risultano ancora oggi molto costosi, fino a 5.000 € per un sistema RTK e dai 10.000 ai 30.000 € per la stazione GPS di riferimento. Alcuni provider offrono un servizio a pagamento di VRS (Stazione di Riferimento Virtuale, in inglese Virtual Reference Station). In questo è il provider che fornirà la posizione di una stazione GPS fissa nelle vicinanze del sito da rilevare, e lo scambio dei dati con il rover richiederà l'impiego di un segnale internet.

Qualsiasi sia il metodo impiegato, una volta che abbiamo fatto la collimazione dei punti di appoggio, si andrà a raffinare la compensazione del blocco fotogrammetrico tramite un apposito comando di **rematch e optimize**, in questo modo si correggeranno i parametri di orientamento della camera che erano stati stimati a priori (senza alcun punto di appoggio). I vari settaggi relativi alla qualità di allineamento vanno ad influire sulla qualità della stima dei vari parametri di orientamento. La distanza focale risulta in ogni caso difficile da stimare a priori, in quanto non vi è un dato per poter scalare il modello in assenza di GCPs.

4.1.5 *Sparse cloud – Nuvola sparsa*

Una volta che tutte le immagini saranno allineate, andremo a ricercare alcuni punti omologhi; determinando prima i punti candidati, trovando poi i corrispondenti omologhi, eliminando in fine gli errori grossolani e stimando così la posizione più corretta per compensazione. Otterremo in questo modo la nuvola sparsa di punti.

In passato questo procedimento veniva fatto a mano, oggi esistono software che processano automaticamente le immagini mediante l'intersezione dei raggi omologhi, realizzata tramite la già citata geometria epipolare (utilizzata nella *computer vision*). L'approccio che si usa prende il nome di SFM (Structure From Motion).

Noti posizioni ed assetto dei fotogrammi, intersecando i raggi omologhi si ottiene la posizione del punto oggetto. Questa è la base del processo di ricostruzione dei modelli partendo dalle immagini, che avviene grazie all'utilizzo di tecniche ABM (Area Based Matching).

“Nelle tecniche di ABM, chiamate anche tecniche di autocorrelazione, la corrispondenza automatica tra punto omologhi avviene mediante il confronto dei toni radiometrici dei pixel nell'intorno dei punti. Solitamente vengono considerate aree quadrate, chiamate **finestre di correlazione**. Il matching avviene valutando il grado di similarità tra le finestre di correlazione, considerando il fatto che i punti omologhi debbano avere finestre di correlazione identiche in termini di valori di toni radiometrici” (Spanò & Chiabrando, 2016).

4.1.6 *Dense cloud – Nuvola densa*

Per generare le nuvole dense, i calcolatori utilizzano un approccio basato sul Semi Global Matching, un algoritmo che si basa sull'assunto che due punti omologhi presenti su due immagini saranno molto simili in termini radiometrici. Inoltre si considera la similitudine tra queste due immagini come una funzione della quota del punto. La quota è maggiore quanto più le disparità radiometriche sono localmente maggiori. Gli schemi di disparità permettono di stabilire quanto diverse sono due immagini che compongono una coppia stereoscopica.

Nuvola densa significa sostanzialmente generare, nei settaggi di qualità più elevati, un punto 3D per ciascun pixel delle immagini che abbiamo utilizzato. Per fare questa operazione spesso c'è necessità di lasciare il calcolatore a lavorare per diverse ore, e la quantità di tempo necessaria dipende dalla quantità di immagini e dalle performance del calcolatore che utilizziamo.

Alcuni software permettono di processare i dati in cloud, oltre che in locale; in questo modo è possibile appoggiarsi a un hardware remoto messo a disposizione del provider.

4.1.7 Mesh triangolata e mesh texturizzata

La fase successiva consiste nella creazione della **mesh triangolata**; ogni software segue delle regole diverse per la creazione di questi triangoli, data la stessa nuvola di punti si ottengono infatti delle mesh triangolate diverse per ciascun software impiegato.

Per generare una superficie, cosiddetta mesh, il software agisce unendo i punti tramite superfici minimali, ovvero triangoli. Una volta ricostruita la superficie, nota la posizione delle camere, posso riproiettare su ciascun triangolino della mesh il colore più corretto, interpolato dalle foto utilizzate per generare il modello fotogrammetrico. Tale procedura si chiama **texture mapping**, e il conseguente prodotto prende il nome di mesh **texturizzata** (Figura 4.11).

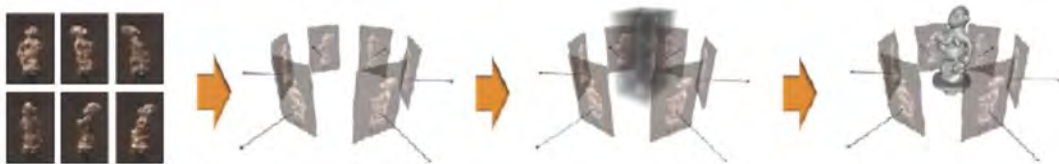


Figura 4.11: Workflow della generazione del modello 3D; dopo aver acquisito le immagini dell'oggetto avviene l'orientamento delle camere, successivamente alla correlazione automatica di 2 o più immagini e al calcolo della nuvola di punti 3D densa è possibile generare modelli tridimensionali dell'oggetto fotografato (De Luca, 2001).

4.1.8 Modelli altimetrici e ortofoto

Un modello altimetrico è un modello che permette di rappresentare il nostro oggetto in 3D, richiede meno tempo per la generazione della nuvola densa. Distinguiamo il **DSM** (Digital Surface Model, ovvero modello digitale della superficie), in cui il colore di ogni pixel rappresenta un dato di quota della superficie; e **DTM** (Digital Terrain Model, ovvero modello digitale del terreno) quando il modello segue il terreno, passando sotto gli alberi e sotto le case (Figura 4.12). Con la fotogrammetria solitamente si segue il DSM, questo è quello che genera ad esempio il software Pix4D; in alcuni casi è possibile filtrare i dati per ottenere il DTM.

Con questi dati posso ottenere i vari prodotti e le varie applicazioni del rilievo tridimensionale, tra cui il calcolo dei volumi di terra e le analisi delle ostruzioni (Figura 4.13). Oltre ad ottenere un modello digitale fotorealistico posso generare anche una **ortofoto**, ossia una immagine del territorio corretta dalle deformazioni prospettiche e proiettata su un piano.



Figura 4.12: Illustrazione schematiche del modello reale (a sinistra) del DSM (al centro) e del DTM (a destra) (Linder, 2016).

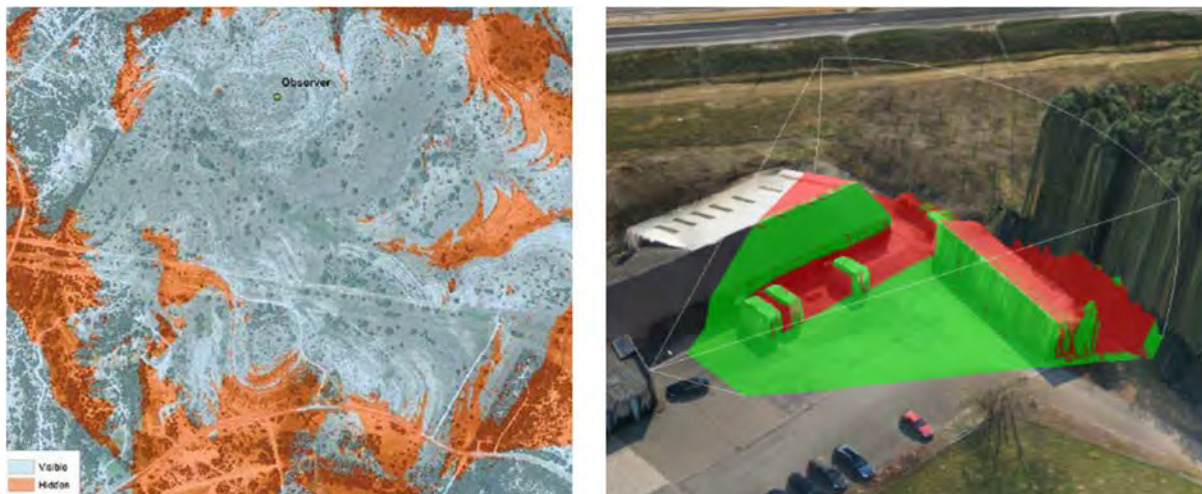


Figura 4.13: Alcuni esempi di analisi delle ostruzioni in ambito topografico (a sinistra) e nel modello 3D (a destra). Le aree rosse rappresentano i punti non visibili dal punto di osservazione analizzato (Fonte: www.verticalspect.com).

Ci possono essere diversi tipi di ortofoto che possono essere estratte da un modello, esistono a tal proposito delle linee guida che ci permettono di distinguere i vari tipi di ortofoto in termini di qualità per le date scale cartografiche (Comitato per le Regole Tecniche sui Dati Territoriali delle Pubbliche Amministrazioni, 2009); in un ortofoto ordinaria sono presenti errori dovuti alla presenza di sottosquadri e ostruzioni generati dalla posizione di presa, Utilizzando il DSM posso eliminare questi artefatti grafici, generando un'ortofoto di precisione. Un'ortofoto di precisione risulta altresì, qualora sovrapposta, coerente con la cartografia.

Unendo il DTM con le ortofoto posso infine ottenere una **ortofoto solida**, avrò cioè delle informazioni 3D associate all'ortofoto di base. In questo modo, grazie anche a un semplice visualizzatore, potrò visualizzare le coordinate planoaltimetriche di ogni punto dell'ortofoto solida; potrò generare delle sezioni mediante piani o individuare dei volumi come intersezioni tra i vari piani; potrò infine misurare delle aree e dei volumi rispetto alla quota base della superficie del terreno. Per la misurazione dei volumi è necessario tracciare la polilinea che racchiude il contorno a terra del volume da misurare (Figura 4.14); il software crea una base

considerando l'altezza di ciascun vertice della polilinea tracciata. La superficie viene successivamente divisa in celle di uguali dimensioni avente come dimensione la GSD. Il volume complessivo viene calcolato sommando i volumi dei parallelepipedi aventi per base la cella di riferimento e per altezza la distanza tra il centro della cella e il punto 3d del terreno insistente sopra il centro della cella di base (Figura 4.15).

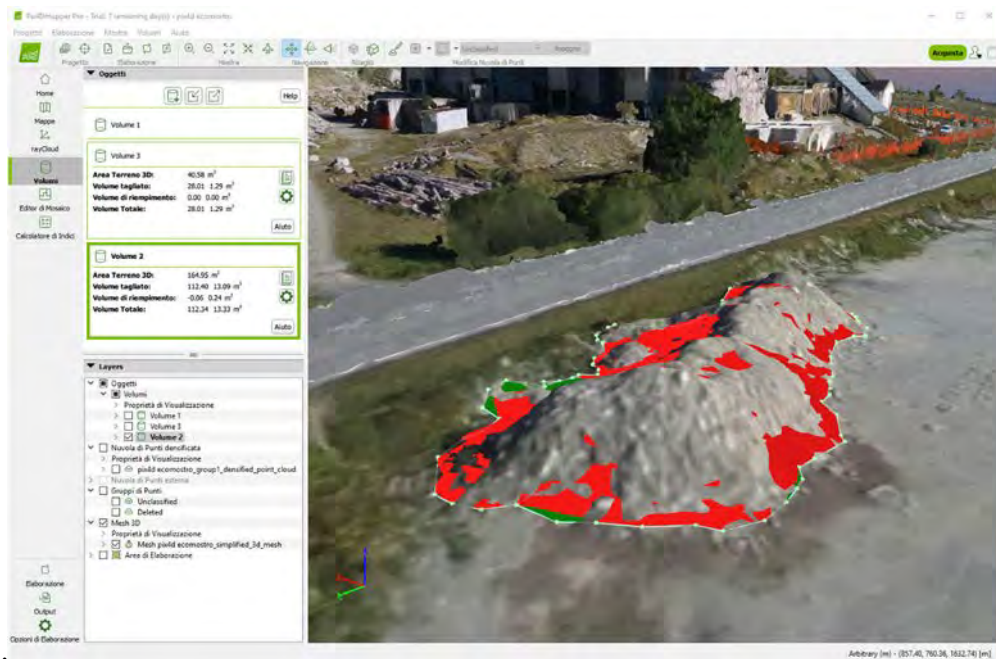


Figura 4.14: Calcolo di un volume di terra.

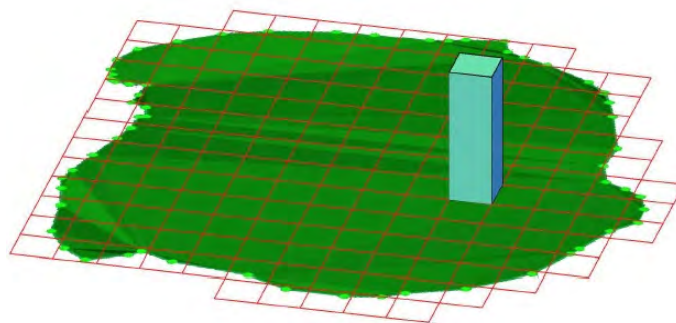


Figura 4.15: Sulla base del volume viene proiettata una griglia (il disegno non rispecchia la reale dimensione della griglia in quanto la griglia utilizzata dal programma ha un intervallo molto piccolo, ossia la Ground Sampling Distance). Il volume di una singola cella è dato da $GSD * GSD * (Z_{Ti} - Z_{Bi})$ dove GSD è la distanza tra due pixel consecutivi misurati a terra, Z_{Ti} è l'altezza del terreno corrispondente al centro della cella e Z_{Bi} è l'altezza della base corrispondente al centro della cella (Pix 4D SA, 2017).

4.2 Rilievo fotogrammetrico da UAV

In questo sotto capitolo viene presa in esame la campagna di acquisizione aerofotogrammetrica condotta nell'ambito delle attività dello stage a Ferrere e Bersezio (alta Valle Stura – CN) volta alla creazione di un modello 3D del cantiere della struttura non ultimata a Bersezio, oggetto del caso studio affrontato in questo capitolo. Il modello generato ha permesso di compiere misurazioni e osservazioni affidabili, configurandosi come strumento aggiuntivo alla valutazione dei rischi.

4.2.1 Raccolta dei dati

La raccolta dei dati è avvenuta tramite l'ausilio di un drone ad ala fissa e di un drone multirotores; la seguente tabella 4.2 illustra le specifiche tecniche dei droni utilizzati per la raccolta dati. È importante far presente che entrambi i droni utilizzati sono considerabili come inoffensivi; in particolare il drone eBee della SenseFly è certificato dall'ENAC come EBM-1539 ed è stato approvato come inoffensivo con riferimento 8351 (Tabella 4.3).

Il drone BeBop 2 di Parrot è invece modificabile tramite un kit di alleggerimento in carbonio, rientrando quindi nella categoria dei droni fino a 300 grammi (conforme all'Art.12 comma 5 del regolamento ENAC “Mezzi Aerei A Pilotaggio Remoto”), abilitato quindi alle operazioni in ambito urbano, anche in presenza di persone (purché non in gruppi numerosi). Il prodotto che ne consegue, chiamato FTD300X, è considerato Upgrade del Parrot BeBop, quindi una rivisitazione in chiave “alleggerita” che ne mantiene le caratteristiche principali. (Fly To Discover, 2016). La tabella 4.3 riporta anche un FTD300X in dotazione al Politecnico.

I voli sono stati effettuati in condizioni meteorologiche favorevoli con velocità del vento inferiore alla brezza leggera. La tabella 4.4 riassume le informazioni sui tre voli.

Sono stati utilizzati in tutto 14 marker a terra per poter controllare e ottimizzare il calcolo fotogrammetrico e georiferire correttamente i dati. I marker sono stati posizionati intorno al sito come mostrato nella figura 4.16. Successivamente sono state misurate le coordinate GPS dei marker nel sistema di riferimento locale (Figura 4.17). Le posizioni dei marker (Figura 4.18) verranno successivamente importate nel software ed utilizzate per georiferire correttamente il modello, come già illustrato nel precedente sottocapitolo.

Tabella 4.2: Specifiche tecniche dei droni utilizzati per la raccolta dei dati.



Drone utilizzato	SenseFly eBee	Parrot Bebop 2
		
Tipologia	Ala fissa	Multirotore (quadricottero)
Dimensioni	96 cm (apertura alare)	38x33x9 cm
Peso	690 g	500 g
Materiali	Ali e carena in polipropilene espanso super leggero, struttura in fibra di carbonio e parti composite	Struttura PA12 rinforzata in fibra di vetro (20%) e Grilamid (carena)
Propulsione	Motore elettrico a corrente continua da 160 W	4 motori Brushless Outrunner
Velocità massima	25 m/s	16 m/s
Autonomia	50 min	25 min
Batteria	11.1 V 2150 mAh	2700 mAh
Portata segnale	3000 m	300 m
Nome camera	Canon S110 18.2 MP	Parrot Bebop 2 14 MP “Fisheye”
Risoluzione camera	4000x3000 pixels	4096x3320 pixels
Dimensioni sensore	7.440 [mm] x 5.580 [mm]	5.734 [mm] x 4.648 [mm]
Sensibilità ISO	ISO-250	ISO-150
Tempo di esposizione	1/400 sec.	1/882 sec
Distanza focale	5 mm	2 mm
Software controllo volo	Pix4Dmapper	Pix4Dmapper

Tabella 4.3: Elenco delle Dichiarazioni rese dagli Operatori SAPR per Operazioni Specializzate non Critiche ai sensi degli artt. 75 e 76 del D.P.R. 445/2000 (ENAC, 2016).

Rif Enac	Numero di Protocollo	Costruttore	Tipo	MTOM	Class.	APR
8351	APR-2016-0001795	Sensefly/Menci	eBee Menci	Kg. 0,75	Inoffensivo	EBM-1539
8362	APR-2016-0001799	Politecnico di Torino	FTD300X	Kg. 0,30	Inoffensivo	029-16

Tabella 4.4: Informazioni sui voli effettuati.

ID volo	Volo 1	Volo 2	Volo 3
Drone	eBee	Bebop 2	Bebop 2
Tipo di riprese	Nadirali	Oblique	Oblique
Tempo di volo	13 min	11 min	9 min
Altitudine	150 m	40 m	50 m
Fotogrammi	124	65	54
Frequenza scatto	6 sec	10 sec	10 sec
Overlap longitudinale	0.8	N/D	N/D
Overlap laterale	0.7	N/D	N/D

Posizione dei centri di presa

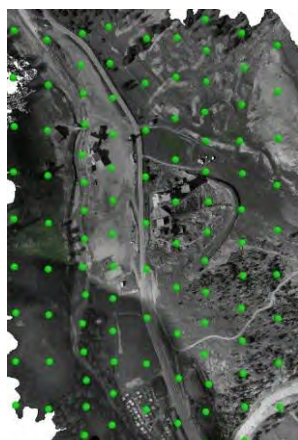




Figura 4.16: Planimetria della distribuzione dei Ground Control Points.



Figura 4.17: Misurazione GPS dei GCPs.



Figura 4.18: Tipologia di marker utilizzato.

4.2.2 Elaborazione dei dati

Per l'elaborazione delle immagini, volte alla restituzione di un modello 3D del sito, è stato utilizzato il software Pix4D (Figura 4.19). Pix4D è un software commerciale di fotogrammetria; il software trova diverse applicazioni nei campi del rilievo dell'architettura, dell'agricoltura, del mercato immobiliare e dell'industria edile. È stato utilizzato anche il software Photoscan di Agisoft, ma date alcune criticità nella gestione delle immagini fisheye del Bebop (Figura 4.20), il workflow è stato interrotto.



Figura 4.19: Illustrazione del workflow del software Pix4D; i dati vengono catturati utilizzando un drone ad ala fissa, ad ala rotante o per mezzo di una normale fotocamera, successivamente vengono elaborati in cloud o in locale, viene poi restituito un modello 3D che è possibile condividere su diversi supporti informatici (Pix 4D SA, 2017).



Figura 4.20: Un esempio di immagine “fish eye” non correttamente gestita da PhotoScan. La distorsione prospettica è direttamente proporzionale alla distanza dal centro dell'immagine.

Dopo aver importato le foto nel software Pix4D e ottimizzato le camere (Figura 4.21), sono stati collimati i punti di appoggio, e seguite le procedure operative descritte nel sottocapitolo precedente.

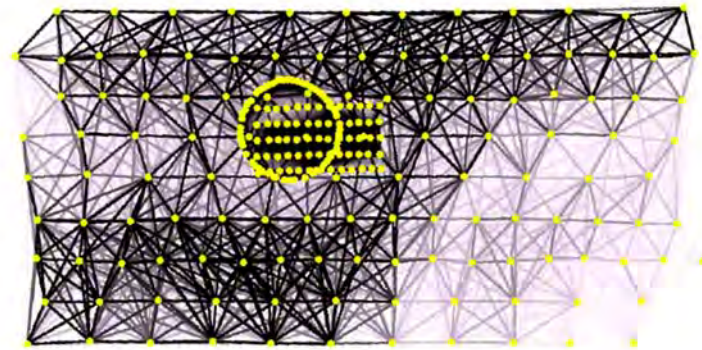


Figura 4.21: Vista dall'alto della posizione delle immagini computate, con un link tra le immagini associate. Le linee scure dei collegamenti indicano il numero di matched keypoints tra le immagini. Un collegamento chiaro indica uno scarso collegamento che richiede più immagini o tie points manuali.

Successivamente, seguendo il workflow operativo del software, si è proceduto alla generazione della nuvola di punti (Figura 4.22). Si è provveduto quindi alla densificazione della nuvola di punti (Figura 4.23) e alla generazione dell'ortomosaico e del corrispondente DSM (Figura 4.24).

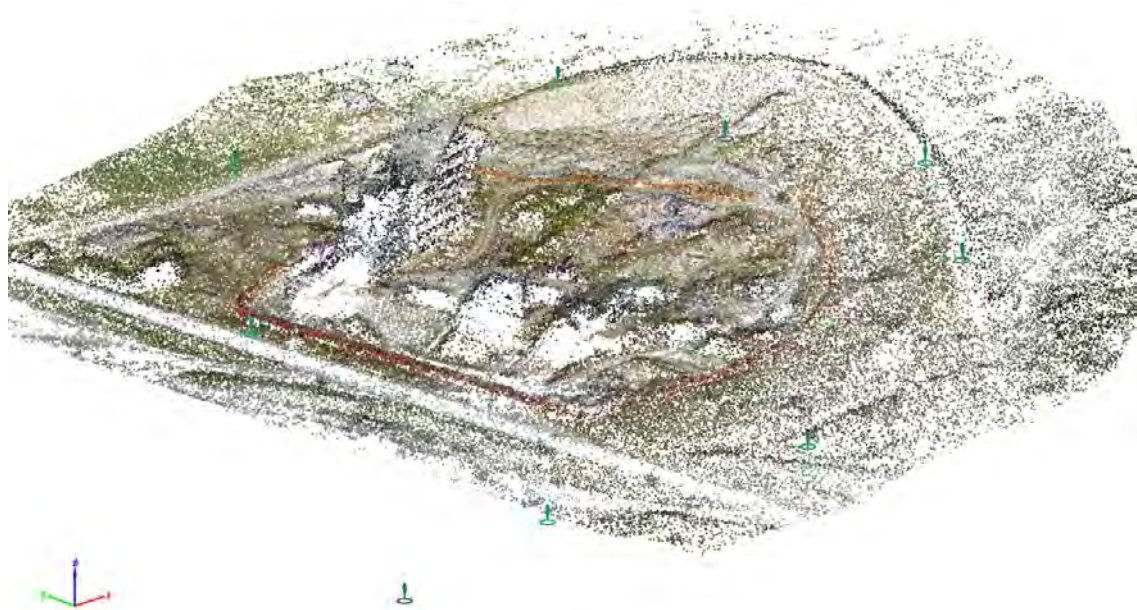


Figura 4.22: Sparse cloud (nuvola sparsa) del cantiere.



Figura 4.23: Dense cloud (nuvola densa) del cantiere.

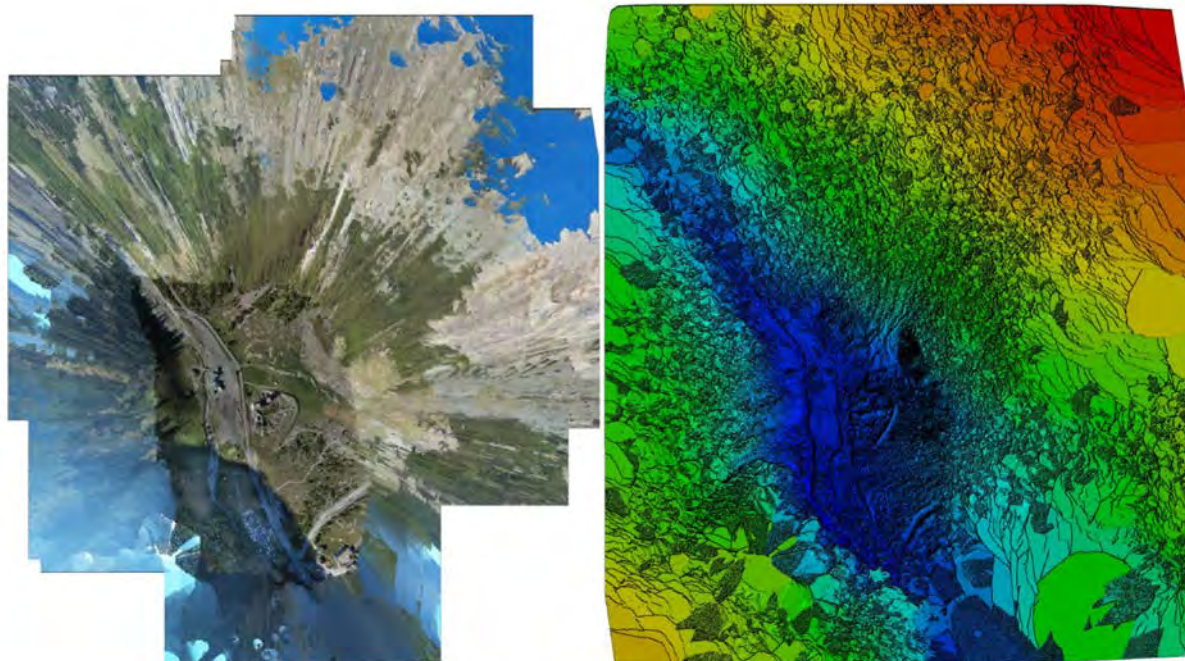


Figura 4.24: Ortomosaico e corrispondente Digital Surface Model (DSM).

La tabella 4.5 illustra le specifiche del dataset e dei parametri di elaborazione.

Tabella 4.5: Specifiche del dataset e dei parametri di elaborazione

Dati del rilievo	Immagini calibrate/immagini totali	243/243
	Punti 3D	1.122.124
	Keypoints 2D	3.698.031
	Errore medio di riproiezione	0,182 pix
	Ground Sampling Distance	5,83 cm
	Area di copertura	0,389 km ²
	Risoluzione	4000 x 3000
Control Points	Numero	10
	Errore quadratico medio X (m)	0.006881
	Errore quadratico medio Y (m)	0.010733
	Errore quadratico medio Z (m)	0.008253
Check Points	Numero	4
	Errore quadratico medio X (m)	0.017216
	Errore quadratico medio Y (m)	0.003866
	Errore quadratico medio Z (m)	0.021751
Parametri di allineamento	Metodo di calibrazione	Standard
	Ottimizzazione parametri interni	Tutti
	Ottimizzazione parametri esterni	Tutti
	Rematch	Si
Parametri di ricostruzione nuvola	Scala immagine	Dimensione originale
	Densità punti	Alta
Nuvola di punti	Punti	1.122.124
	Errore quadratico medio	0,008 m
	Densità media punti al m³	35.89
	Punti (Nuvola densa)	220.854.793
Modello	Triangoli	1.000.000
	Texture	16,384 x 16,384

Vengono di seguito riportati alcuni dati sui tempi di acquisizione e di elaborazione dei dati (Tabella 4.6).

Tabella 4.6: Tempi di acquisizione e di elaborazione del dataset relativo al cantiere della struttura non ultimata a Bersezio (CN).

Numero fotogrammi	Tempo di acquisizione	Tempo di elaborazione*
243	33 min	< 36 h

*Dipende dall'hardware della macchina utilizzata e da eventuali processi contemporanei all'elaborazione; in questo caso è stato utilizzato un PC con Windows 10 PRO 64 bit, Processore Intel Core i7-2600 @ 3.40 GHz (8 CPUs), 24 GB di Ram e due Schede grafiche NVIDIA GeForce GTS 450.

Si può dire che gli errori si collocano sotto i due centimetri, pertanto i risultati ottenuti sono da considerarsi accettabili per la generazione di una planimetria di cantiere in scala 1:200.

Inoltre, nonostante il relativamente elevato GSD di 5,83 cm, il modello texturizzato consente una buona ispezione visiva in rapporto alla scala proposta.

Utilizzando ortofoto georiferite e dati 3D così generati, è possibile monitorare l'evoluzione di un cantiere, visualizzare il modello *as-built*, gestire le lavorazioni di movimentazione terra e ottenere dettagli virtuali per effettuare ispezioni in maniera più efficiente.

I dati vengono catturati tramite il drone, senza l'esigenza di entrare fisicamente dentro il cantiere o interferire con i lavori; vengono processati successivamente in locale o in cloud.

Utilizzando ortofoto o modelli 3D generati con tecniche fotogrammetriche, è possibile comparare lo stato di avanzamento dei lavori con i disegni di progetto. Il processo può essere ripetuto su base giornaliera per fornire sempre un modello aggiornato del cantiere e mantenere il controllo del processo costruttivo. Questo permette anche di mostrare ai clienti l'avanzamento dei lavori senza farli entrare fisicamente dentro il cantiere, riducendo eventuali rischi derivanti da interferenze dei visitatori.

È possibile creare un database di immagini georeferenziate per condurre ispezioni postvolo; identificando criticità tramite una ispezione virtuale, visualizzando dettagli strutturali da angoli diversi, è possibile effettuare delle misure attendibili da remoto. La potenzialità di navigare il modello e di misurarlo direttamente dall'ufficio concede al safety manager di poter riesaminare eventuali informazioni non carpite durante il normale sopralluogo.

4.2.3 Restituzione e fruizione del modello 3D

Al fine di rendere fruibile il modello ottenuto è stato utilizzato il software 3DHOP creato da Visual Computing Laboratory, ISTI (Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione) e CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche). 3DHOP (3D Heritage Online Presenter) è un pacchetto software open-source per la creazione di presentazioni web interattive di modelli 3D ad alta risoluzione. Il software trova il suo originario impiego nel settore dei beni culturali, con particolare riferimento a chi intende aumentarne la loro fruizione, come ad esempio curatori museali con capacità di base sulla gestione di contenuti IT. Il software, totalmente gratuito e open source, può anche essere utilizzato da Web designer esperti che vogliono personalizzare l'interfaccia utente, incorporando contenuti 3D personalizzati, così come piccole aziende che sviluppano applicazioni web o totem per istituzioni museali.

La visualizzazione del modello 3D avviene direttamente all'interno di una pagina web standard, tramite l'utilizzo di componenti HTML che fanno riferimento a un pacchetto JavaScript pronto all'uso. I contenuti personalizzati e le interazioni possono essere configurati tramite una procedura di tipo "dichiarativo", ovvero richiamando all'occorrenza le varie funzioni contenute all'interno del pacchetto JavaScript.

Utilizzando un modello di gestione 3D multi risoluzione, il quale supporta un efficiente streaming, 3DHOP è capace di lavorare con modelli 3D ad alta risoluzione (1-100 milioni di triangoli) con facilità e anche con basso consumo di banda.

Il file 3D della nuvola di punti e della mesh texturizzata del cantiere dismesso di Bersezio è stato prima esportato in formato .ply, poi è stato convertito in formato .nxs tramite Nexus. Nexus è un pacchetto software per la creazione e la visualizzazione di mesh multirisoluzione. L'obiettivo principale è di rimuovere il collo di bottiglia della CPU nella visualizzazione multirisoluzione. Il file generato è ulteriormente comprimibile per una migliore ottimizzazione dello spazio server e un consumo minore di risorse di banda.

Le immagini seguenti mostrano la nuvola di punti (Figura 4.25) e la mesh texturizzata (Figura 4.26) del modello del cantiere. Il modello è stato caricato sulla piattaforma GitHub (Calantropio, 2017). Cliccando sulla sezione "cantiere". Una toolbar permette di utilizzare alcuni strumenti tra cui l'utilissimo righello per poter in qualsiasi momento ricavare misure affidabili dal modello.

Un vantaggio rispetto alle tecniche tradizionali è che il modello 3D del cantiere restituisce un feedback più ampio rispetto ai disegni del progetto. Visualizzando ad esempio il cantiere da

una visuale dall'alto è possibile cogliere il quadro di insieme e confrontare as-built e as-planned anche senza l'ausilio di algoritmi di comparazione. Il grado di automazione del processo dipende anche dal grado di complessità e dalla grandezza generale del cantiere. Per cantieri piccoli e con gradi di ingegnerizzazione non elevati non sarebbe infatti economicamente sostenibile implementare un sistema che confronti automaticamente il progetto con l'evoluzione reale della costruzione.

La possibilità di visualizzare in qualsiasi momento, anche dal proprio tablet o smartphone, il modello, consente di eseguire misurazioni volte a valutare, ad esempio, la larghezza di un accesso per un mezzo non convenzionale o la distanza da un luogo di una lavorazione a un vincolo aereo (es. linea dell'alta tensione, braccio della gru o piattaforme di lavoro mobili elevabili) è infatti difficile oltre che poco raccomandabile misurare una distanza terra-aria basandosi sulla percezione. Il modello permette di compiere misurazioni affidabili in pochi secondi e costituisce quindi uno strumento aggiuntivo alla valutazione del rischio.

L'interfaccia web è ulteriormente implementabile, ad esempio mediante una rubrica di contatti relativi ai soggetti coinvolti (Committenti, progettisti, RSPP, etc.) o mediante l'integrazione di una funzione di diario giornaliero, che possa contenere eventuali note o osservazioni dei tecnici preposti alla sicurezza.



Figura 4.25: Schermata della pagina web sulla quale è visualizzato il modello 3D della nuvola di punti del cantiere.



Figura 4.26: Schermata della pagina web sulla quale è visualizzato il modello 3D della mesh texturizzata del cantiere.

4.3 Workflow operativo per la valutazione dei rischi legati al contesto

La prevenzione è il concetto di base insito nel Piano di Sicurezza e Coordinamento, pertanto si devono prevedere i probabili fattori di rischio attraverso una conoscenza approfondita del luogo in cui avverranno i lavori, tale da anticipare le problematiche che potrebbero manifestarsi, pianificando di conseguenza le eventuali soluzioni (in altre parti del PSC), non lasciando nulla al caso e all'improvvisazione. In questa parte il supporto della Geomatica trova il suo massimo potenziale d'espressione riguardo le tematiche trattate in questa tesi, soprattutto dato l'apporto cartografico tradizionale e dei sistemi informativi territoriali. Quanto segue in questo sottocapitolo è una proposta di work flow che analizza e individua tutti i fattori di rischio connessi al sito, cioè tutto quello che può interferire con l'esecuzione dei lavori in un dato contesto (Gottfried, et al., 2011).

Si precisa che il cantiere oggetto dell'analisi risulta dismesso alla data dei rilievi. Le considerazioni che seguono derivano da rischi generati in una eventuale futura ripresa delle attività lavorative, nel caso si intenda ad esempio procedere al completamento dei lavori o alla demolizione delle opere precedentemente realizzate.

4.3.1 Caratteristiche intrinseche dell'area

4.3.1.1 Descrizione e ubicazione dei lavori

Nel sito era stato sviluppato un progetto di realizzazione di una nuova struttura ricettiva per il turismo montano e sciistico nella frazione Bersezio del comune di Argentera, in provincia di Cuneo. I lavori iniziati e mai finiti hanno determinato la presenza di un cantiere dismesso nel lotto antistante l'Area Camper Bersezio, in prossimità degli impianti di risalita Argentera Ski e di un piccolo campo sportivo; il sito è raggiungibile percorrendo la Strada Statale della Maddalena (SS21) fino al chilometro 50+600.

Il lotto, di forma approssimabile a un pentagono irregolare è confinante:

- A ovest con la SS21, un'importante strada statale che collega l'Italia alla Francia. Ha inizio nel comune di Borgo San Dalmazzo, dalla Strada statale 20 del Colle di Tenda e di Valle Roja, e segue il corso del fiume Stura di Demonte attraverso la Valle Stura di Demonte; su un tracciato pianeggiante attraversa i comuni di Roccasparvera, Gaiola, Moiola, Demonte, Aisone, Vinadio e arriva a Pianche, dove inizia a risalire rapidamente superando un notevole dislivello. Attraversa quindi Sambuco, Pietraporzio, e Argentera, che si trova a 1.684 m s.l.m. Gli ultimi km, con una dozzina di tornanti, conducono al confine di stato con la Francia, sul Colle della Maddalena (1.996 m s.l.m.). In territorio francese la strada prosegue con il nome di D 900 e

come si evince dalla sigla, non è classificata come nazionale, ma solamente come dipartimentale. La lunghezza totale è di 59,708 km. Sul tratto antistante l'area oggetto di intervento non sono presenti marciapiedi o banchine percorribili, mentre la larghezza, compresa tra le due strisce di delimitazione della carreggiata, è pari a 7,5 m. Il limite di velocità previsto su questa porzione dell'asse viario è di 50 km/h (da considerare per la pianificazione del transito veicolare). L'edificio prospiciente rappresenta la realizzazione recente del grande progetto incompiuto: è costituito da un area per camper, su cui insistono degli edifici in cui sono presenti una trattoria e una scuola di sci (Figura 4.27); dietro di esso un piccolo edificio funzionale agli impianti di risalita. È altresì presente un piccolo campo sportivo. Proseguendo ancora su questo lato si incontra il torrente Stura di Demonte.

- Sugli altri lati confina con praterie costituite da incolti erbacei e destinate prevalentemente al pascolo (Figura 4.28).

La recinzione esistente, che verrà rimossa alla fine del cantiere, è costituita da rete plastificata arancione sul lato esterno al cantiere, mentre sul lato interno è costituita da rete metallica elettrosaldata, la stessa ha un andamento variabile per un'altezza di circa 2m. Gli edifici progettati sono a pianta rettangolare con falda a 45° circa. Questa forma risponde a una logica di integrazione con il contesto montano. La struttura è realizzata in cemento armato (Figura 4.29).



Figura 4.27: Edifici della trattoria e della scuola sciistica.



Figura 4.28: Ortofoto del contesto del cantiere (non in scala) generata da drone ad ala fissa eBee.



Figura 4.29: Ortofoto del cantiere (non in scala) generata da drone ad ala fissa eBee.

4.3.1.2 Caratteristiche geomorfologiche del terreno

In questa parte si dovrebbe tener conto della relazione geologica e/o geotecnica presente nel progetto esecutivo, evidenziando gli aspetti significativi per la sicurezza durante l'esecuzione delle opere. Tali descrizioni sono volte solamente ad evidenziare gli aspetti critici in modo che l'esecutore possa valutarne gli aspetti legati al cantiere, senza sostituirsi alla relazione redatta dal tecnico specialista.

Da un'indagine preliminare si evince che il terreno:

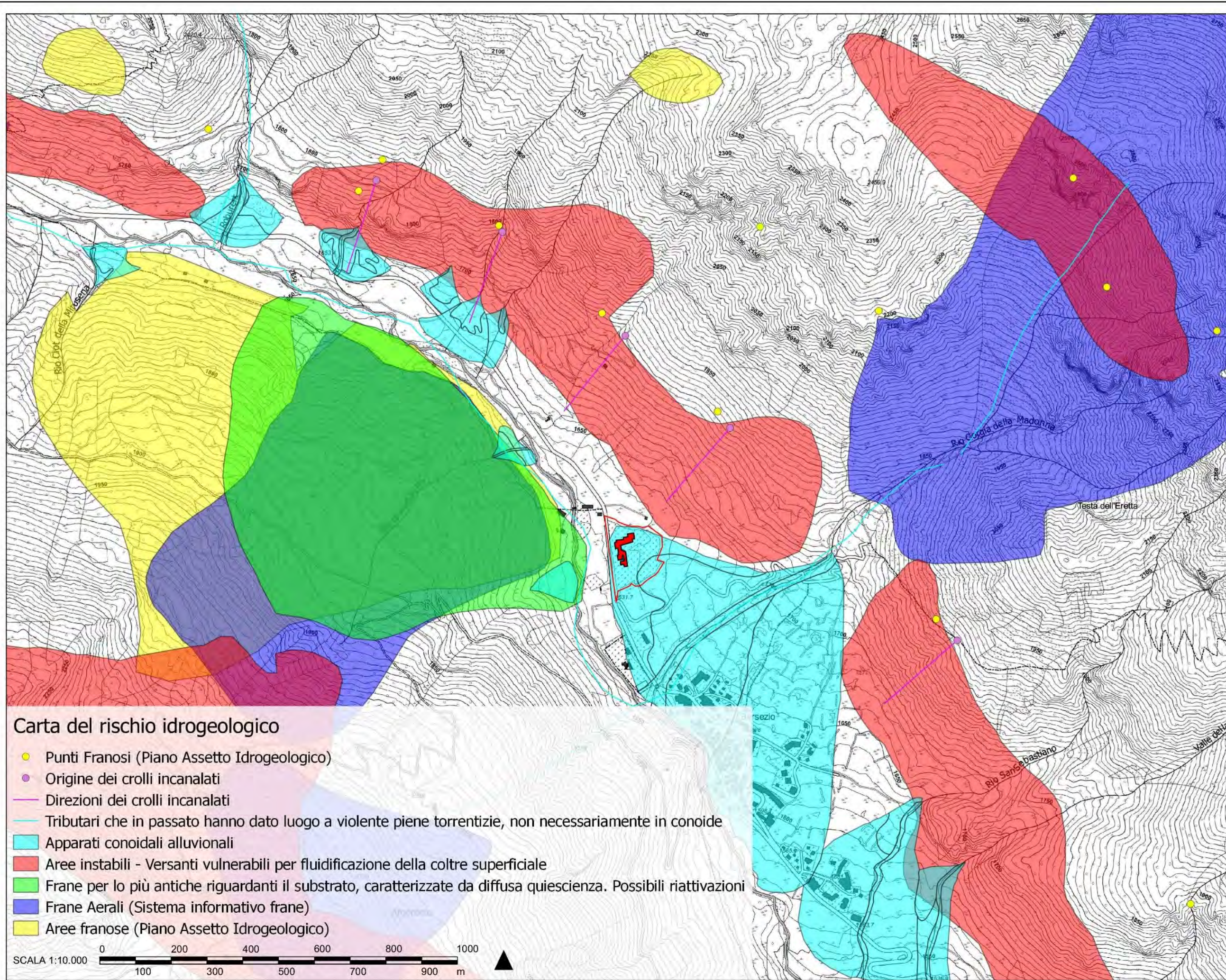
- Il sito insiste su un conoide di deiezione. Le conoidi più stabili sono spesso (anche storicamente) sede di abitati e di terreni agricoli o impianti industriali. Questo non dovrebbe mai far dimenticare l'intrinseca instabilità di questi territori e il rischio idrogeologico connesso. (Tavola A – Realizzata tramite software QGIS utilizzando i metadati dei geodatabase ARPA, Regione Piemonte e Istituto Geografico Militare).

- Considerato che il cantiere insiste su un conoide alluvionale, data anche la vicinanza al torrente Stura di Demonte, è probabile la presenza di falda acquatica sotterranea. (Tavola B – Estratta dal sistema informativo vincoli territoriali – Sistema Cartografico Online della Provincia di Cuneo).

- È costituito da materiale parentale definito da calcari e dolomie, in particolare da calcari organogeni e biodetritici neritici e di piattaforma (Cretacico). Secondo il foglio n.78 della carta geologica d'Italia (Figura 4.30) il terreno è costituito da detriti di falda e terreni detritici in genere; frane e detrito a blocchi; detrito di falda e terreni detritici cementati, essenzialmente prewurmiani (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 1971).

- Il terreno sul quale si dovrà intervenire risulta avere una pendenza non indifferente, occorre tenerne conto per vari motivi, uno dei principali è la possibilità che ci siano ribaltamenti dei mezzi. La pendenza del terreno può anche risultare pericolosa per il scivolamento di attrezzatura lungo le pendici.

- È classificato come zona 3 nel sistema sismico nazionale.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

Alessio Calantropio

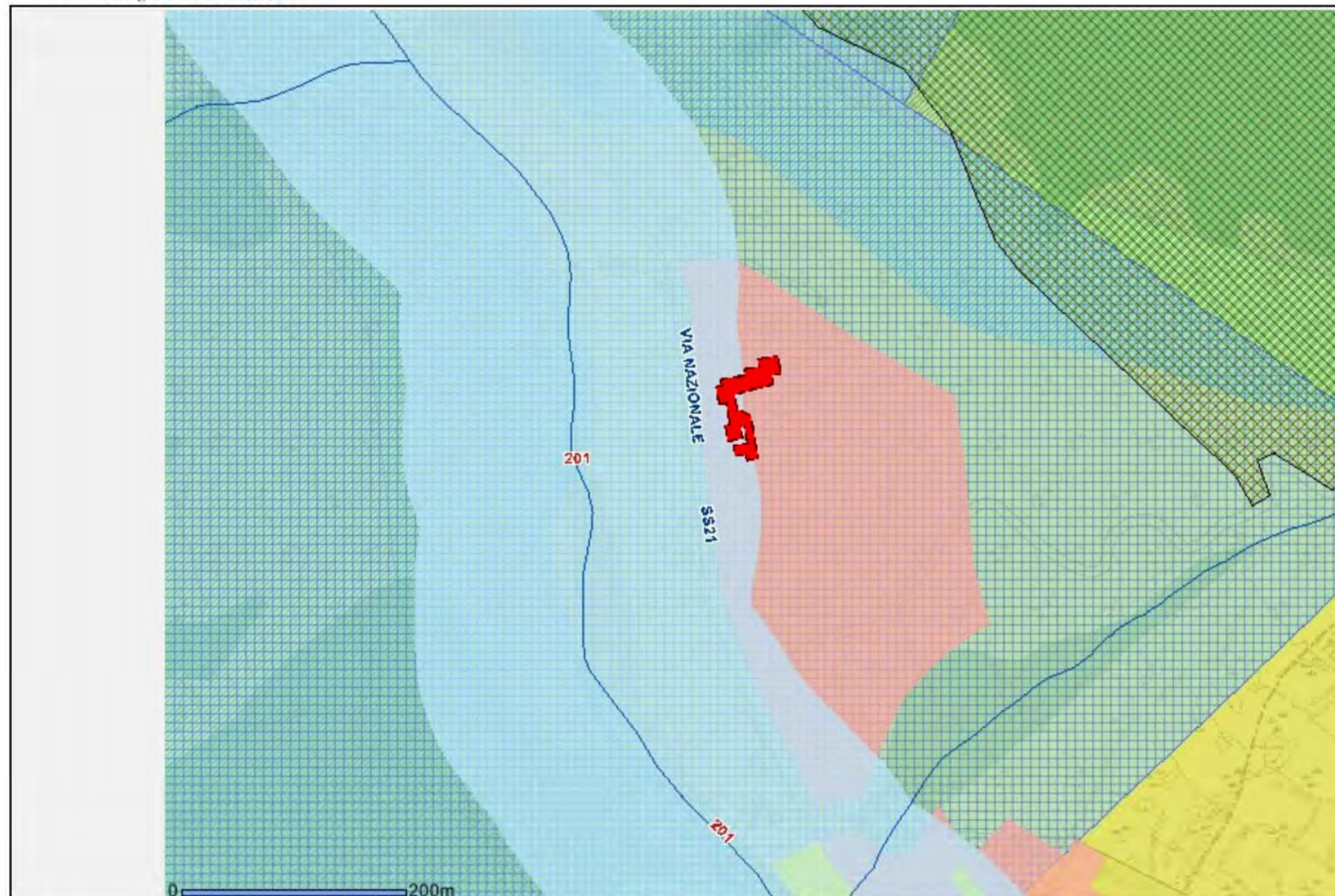
Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA A

Carta del rischio idrogeologico
Software: QGIS open-source
Fonti: geodatabase ARPA, Regione Piemonte e IGM

Cantieri della struttura ricettiva di Bersezio





Scala 1:5000

Rocce e ghiacciai



Idrografia principale




Acque pubbliche





Fasce rispetto acque pubbliche




Mosaicatura PRG 2000 - Mosaico PTP

 Aree Urbane a matrice storica

 Aree residenziali

 Servizi

 Aree produttive di rilievo sovracomunale

Mosaicatura PRG 2000 - Aree sciistiche



Vincolo idrogeologico




Aree superiori a 1600 metri




Aree Boscate




Classi d'uso dei suoli


 IV - Quarta

 VI - Sesta

 VII - Settima

Rete Stradale

 Aree urbane

 Aree extraurbane

Limiti Comunali



Zone protezione speciale - ZPS



TAVOLA B

Carta dei vincoli territoriali
Fonti: Sistema Cartografico
Online - Geodatabase della
Provincia di Cuneo

Cantiere della struttura
ricettiva di Bersezio



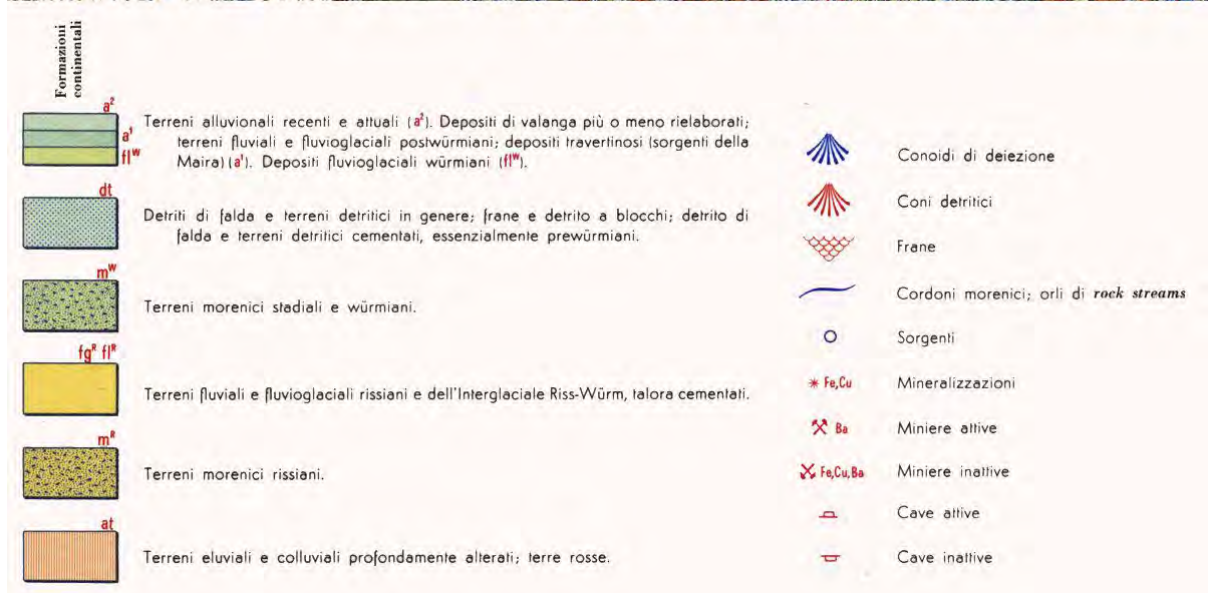
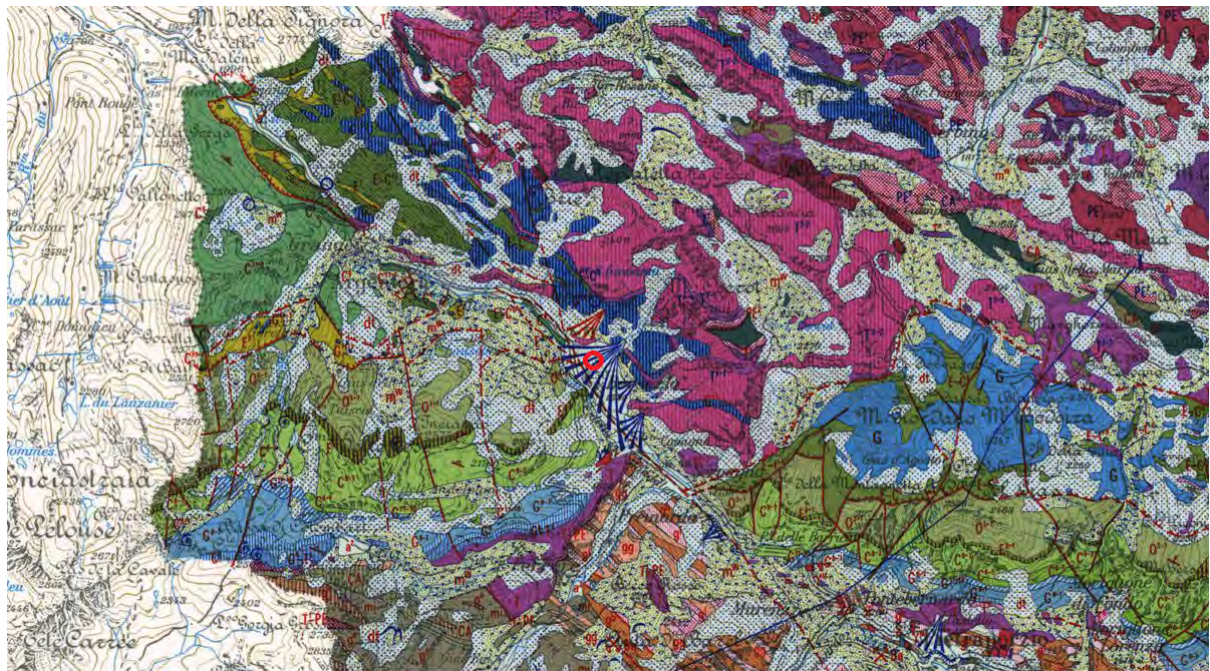


Figura 4.30: Foglio n.78 della Carta Geologica d'Italia (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 1971). Il sito è indicato da un cerchio rosso al centro della mappa.

4.3.1.3 Vincoli di sottosuolo

Alla data del sopralluogo il lotto non presentava vincoli di sottosuolo, ad eccezione di quelli costituiti dalla fondazione degli edifici già in parte realizzati.

L'attività di valutazione del rischio bellico è condotta dal CSP ai sensi dell'art. 91, comma 2-bis del Decreto Legislativo 12 aprile 2008, n.81. Le indagini preliminari sono propedeutiche alla eventuale bonifica sistematica da ordigni esplosivi residuati bellici.

Il sito si trova a 6,6 Km a Sud-Est del passo della Maddalena, che segna il confine con la Francia, e a 9,6 Km a Sud-Est del Fortino Sant’Orso, una fortificazione francese in cemento armato, realizzata dal 1931 al 1936, facente parte della Linea Maginot delle Alpi ed utilizzata durante la seconda Guerra Mondiale (Figura 4.31).

L’area fu oggetto di un evento bellico avvenuto il 24 giugno del 1940, quando la 36° Divisione di fanteria “Forlì” oltrepassò il confine (Kaufmann & Kaufmann, 2006).

Furono in tutto sparati 92 colpi di cannone e 379 colpi di mortaio, l’armistizio del 25 giugno pose fine alla battaglia (Figura 4.32). Il forte venne demilitarizzato dalle forze italiane, successivamente fu occupato dalla 19a armata tedesca nell’agosto del 1943, per essere poi evacuato la notte del 22 aprile 1945, venendo riconquistato il giorno successivo dalle forze francesi. Riabilitato nei primi anni 50 per la Guerra Fredda, venne definitivamente abbandonato nel 1968 (Mary, et al., 2009).

La distanza da aeroporti e linee ferrate utilizzati in periodo bellico, la gittata delle armi utilizzate (inferiore ai 6 km) così come l’assenza di bombardamenti aerei porterebbe ad escludere che possano essere ritrovati ordigni inesplosi nel sottosuolo.



Figura 4.31: Fortino Sant’Orso (Ouvrage Saint Ours Haut) posto a difesa del passo della Maddalena (Col de Larche).



Figura 4.32: Mappa degli attacchi italiani al fronte alpino francese nel 1940. In rosso il sito oggetto di questo studio.

Un comunicato del Ministero della Difesa, datato 3 maggio 2016, avente per oggetto “Bonifica sistematica da ordigni esplosivi residuati bellici. Precisazioni su indagini preliminari propedeutiche alla valutazione del rischio.” chiarisce che ci si può limitare a “*un’analisi storica della zona di interesse al fine di determinare se la stessa sia stata coinvolta da eventi bellici*”

ovvero se nel suo ambito vi siano stati precedenti rinvenimenti di ordigni, prevedendo eventualmente un'indagine magnetometrica superficiale". Nel corso di queste indagini non possono essere eseguite attività di tipo invasivo sul terreno, né rilasciare attestazione che il terreno di interesse sia esente da rischio bellico, dato che l'indagine superficiale non fornisce alcun dato a profondità maggiore di un metro dal piano di campagna.

4.3.1.4 Sottoservizi impiantistici

Alla data del sopralluogo il lotto non presentava vincoli di sottosuolo, ad eccezione di quelli costituiti dai sottoservizi degli edifici già in parte realizzati. Ogni impresa esecutrice dovrà procedere ad una verifica puntuale dello stato dei luoghi almeno dieci giorni prima dell'atto effettivo dell'inizio lavori con sopralluogo congiunto con il CSE al fine di verificare ogni ulteriore vincolo o preesistenza attualmente imprevedibile. Le risultanze di queste ulteriori indagini dovranno essere comunicate al CSE prima della consegna del POS al fine di valutare modifiche e integrazioni al PSC.

4.3.1.5 Vincoli di superficie inamovibili e preesistenze

Alla data del sopralluogo il lotto non presentava vincoli di superfici inamovibili e preesistenze, ad eccezione di quelli costituiti dagli edifici già in parte realizzati. La recinzione posta intorno al cantiere dovrà essere smantellata alla fine dei lavori, per cui non è richiesto alcun intervento di protezione della stessa.

4.3.1.6 Vincoli aerei

Alla data del sopralluogo il lotto non presentava vincoli aerei. Non risultano presenti linee dell'alta tensione sopra il cantiere o nelle sue immediate vicinanze. Gli impianti di risalita (Figura 4.33) sono situati sufficientemente lontani dal cantiere, pertanto non sono considerabili come fonte di rischio o interferenza.

4.3.1.7 Condizioni climatiche

Ai sensi del D.lgs 9 aprile 2008, n. 81 – Allegato XV l'impresa dovrà tenere conto che sono fortemente collegate alla salute ed alla sicurezza dei lavoratori, oltre le temperature estreme, anche la presenza di vento, le precipitazioni atmosferiche e l'eventuale presenza di ghiaccio. Il sito sorge in zona climatica F e si registrano 4.403 gradi giorno.

4.3.1.8 Vegetazione

Nell'area interessata dai lavori è importante la presenza di vegetazione, questa può avere diversi tipi di interazione con il cantiere, a seconda della stagione è possibile che l'area di vegetazione

disperda nell'ambiente foglie o altro materiale che potrebbe sporcare il cantiere e creare dei potenziali pericoli. La presenza di vegetazione inoltre richiede particolare attenzione dal punto di vista del possibile sviluppo di incendi, pertanto è necessario provvedere a tenere lontano attività e lavorazioni che richiedano l'uso di attrezzature a fiamma libera o di attrezzature ad alta temperatura. Oltre a questo esiste il rischio che alcune piante rilascino nell'aria pollini o altro che provochi reazioni allergiche ai lavoratori, pertanto le piante presenti vanno classificate e occorre effettuare opportuni esami (in relazione alle specie presenti) ai lavoratori delle imprese per assicurarsi che questi non subiscano alterazioni durante le lavorazioni che potrebbero risultare pericolose. Occorre verificare prima dell'impianto di cantiere lo stato di salute delle piante e verificare se ci sono pericoli per la sicurezza.



Figura 4.33: Gli impianti di risalita.

4.3.1.9 Proiezione e cadute di masse verso l'interno del cantiere

Il cantiere insiste in un area a rischio idrogeologico, in particolare su un conoide alluvionale e nelle immediate vicinanze di un punto franoso, in direzione di possibili crolli incanalati. L'anello di terra di riporto presente sul versante sud e est del cantiere potrebbero non essere sufficienti ad impedire la proiezione di masse verso l'interno in caso di un episodio franoso.

Considerando inoltre la natura dei lavori, sono necessari ulteriori studi su eventuali rischi che operazioni di demolizione potrebbero comportare instabilità del versante montano, già vulnerabile per fluidificazione della coltre superficiale.

4.3.1.10 Emissione di agenti inquinanti dall'ambiente verso il cantiere

Il lotto si trova in una zona relativamente distante dal centro abitato, il flusso veicolare sulla Strada Statale 21 non è tale da prevedere code con i conseguenti problemi di ristagno di inquinanti. Relativamente alla valutazione del clima acustico non potendo, normalmente, considerare il cantiere come ricettore sensibile per la valutazione dell'impatto acustico e, considerando il contesto, si rimanda ad una valutazione successiva in relazione alle scelte di allocazione logistica fatte dall'Appaltatore, anche in relazione alla distanza effettiva di questi dalla sede stradale e alla tipologia di barriera messa in opera. Per quanto riguarda il rischio vibrazioni al momento del sopralluogo niente è stato rilevato in riferimento a questa forma di inquinamento.

4.3.2 *Impatto ambientale del cantiere*

4.3.2.1 Proiezione e cadute di masse all'esterno del cantiere

Dopo aver analizzato il progetto e la sua collocazione si valuta il rischio di proiezione e cadute di masse all'esterno del cantiere come rilevante, in riferimento alle immediate vicinanze con la Strada Statale 21. Pertanto maggiori accorgimenti dovranno essere presi in considerazione quando verranno svolte lavorazioni sui fronti strada, in quanto la recinzione attualmente presente potrebbe non essere sufficientemente idonea.

4.3.2.2 Emissione di agenti inquinanti dal cantiere verso l'ambiente circostante

Dovrà essere rispettato il criterio differenziale per l'impatto acustico secondo il quale il rumore prodotto dal cantiere non potrà superare di 5 dB, nel periodo diurno, e di 3 dB, nel periodo notturno, il valore residuale da misurare nel lotto in assenza di altre forme di inquinamento fatto in fase di progetto definitivo.

Qualora le delimitazioni del cantiere non siano sufficienti ad eliminare la diffusione delle polveri, dovrà essere programmato un intervento di mitigazione, agendo sia sulle delimitazioni sia sulle procedure operative delle lavorazioni.

In riferimento alle lavorazioni che si effettueranno nel cantiere, alla quota di scavo e alla tipologia del terreno, non si ritiene rilevante un eventuale inquinamento da vibrazione verso l'ambiente circostante.

Considerata invece la fascia di rispetto acquatica, in tale zona è necessario non effettuare lavorazioni o utilizzare sostanze che possano essere disperse nell'ambiente e contaminare l'acqua del torrente Stura di Demonte.

4.3.3 Interferenze con le condizioni di esercizio dell'area

4.3.3.1 Interferenze con attività produttive e cantieri limitrofi

Alla data del primo sopralluogo non erano presenti attività produttive o cantieri limitrofi. Al momento della consegna dei lavori si procederà alla ulteriore verifica dello stato dei luoghi.

4.3.3.2 Interferenze con edifici limitrofi e viabilità al contorno

La possibilità di accedere al lotto solo dal punto posto a sud-est sulla SS21 (Figura 4.34) potrebbe costituire interferenze sia con il traffico veicolare della stessa sia con il traffico in entrata e in uscita dal parcheggio per camper nelle immediate vicinanze. Il cantiere sorge inoltre in prossimità del capolinea della linea 102 Vinadio – Argentera della compagnia Bus Company. Pertanto tutti i mezzi, pesanti e non, in entrata ed in uscita dal cantiere dovranno sempre prestare la massima attenzione al traffico veicolare ed ad eventuali pedoni.



Figura 4.34: Accesso al cantiere.

Parte II

I cantieri di intervento in emergenza sismica

5. Geomatica e sicurezza nel disaster management

I disastri naturali hanno spesso effetti devastanti sull'ambiente antropizzato e, causa del loro repentino manifestarsi, possono infliggere gravi danni in una manciata di secondi (Figura 5.1). Nonostante non siamo in grado di prevedere un terremoto, possiamo oggi analizzare le cause scientifiche che lo generano, studiando le caratteristiche più vulnerabili del territorio di alcune regioni stimandone l'esposizione al rischio sismico.

La Geomatica, insieme alla Geotecnica, trova un importante impiego in diversi aspetti legati allo studio dei terremoti, come la zonizzazione del territorio e la valutazione dei danni alle opere architettoniche e infrastrutturali. Le ultime tecnologie a disposizione permettono di mappare aree estese ed analizzarne le proprietà, come la deformazione crostale, la direzione delle faglie, le anomalie termiche, geologiche etc., sia a livello spaziale che multitemporale. Il telerilevamento, il mapping, la fotogrammetria e il GIS sono strumenti e tecniche che garantiscono la raccolta di informazioni ambientali cruciali, e permettono di analizzare in maniera speditiva, accurata ed economica i danni del patrimonio edilizio, storico e culturale.

Le nuove tecniche e tecnologie forniscono oggi svariate soluzioni, volte alla documentazione dei danni, alla valutazione dei rischi e alla gestione efficiente dei dati acquisiti. L'impiego di sensori low cost, specie quelli legati alla fotogrammetria aerea, costituiscono un buon compromesso tra accuratezza e tempi di acquisizione. Grazie alla diffusione dei droni, insieme al miglioramento dei software di fotogrammetria e degli algoritmi di image-matching, negli ultimi anni le soluzioni della Geomatica hanno contribuito con un supporto attivo alle attività di documentazione dei danni, sia ambientali che del costruito (Chiabrando, et al., 2017).

In questo capitolo viene preliminarmente inquadrato il problema, riportando una descrizione del fenomeno sismico, le sue cause e le scale di misura dei terremoti. Viene analizzato il rischio sismico e la suddivisione del territorio nazionale nelle aree sismogenetiche. Segue uno storico dei terremoti verificatisi in Italia negli ultimi cento anni. Concludono il capitolo alcuni esempi relativi allo stato dell'arte, riguardanti la Geomatica applicata al damage assessment e la topografia applicata al soccorso.

5.1 Il fenomeno sismico

“I terremoti (dal latino *terrae motus*, cioè "movimento della terra"), detti anche sismi o scosse telluriche (dal latino *Tellus*, dea romana della Terra), sono vibrazioni o oscillazioni improvvise, rapide e più o meno potenti, della crosta terrestre, provocate dallo spostamento improvviso di una massa rocciosa nel sottosuolo.” (CGIL Pesaro, 2012).

L'interno della terra è costituito da rocce disomogenee (per densità, pressione e temperatura); questa condizione genera lo sviluppo di forze negli strati superficiali (come la crosta e il mantello superiore) che tendono a riequilibrare il sistema spingendo tra di loro le varie masse rocciose. Questi spostamenti, di natura tettonica, avvengono continuamente per migliaia o milioni di anni. I movimenti delle zolle (o placche) che compongono la litosfera generano energia che, superato il limite di resistenza, causa la frattura delle rocce causando profonde spaccature dette **faglie**. L'energia viene liberata sotto forma di **onde sismiche** che si manifestano con effetti distruttivi sul territorio; gli edifici crollano se non sono costruiti con accorgimenti antisismici, mentre il paesaggio naturale viene interessato da fenomeni quali maremoti, frane o liquefazione dei terreni (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

Un sisma è caratterizzato da scosse chiamate **periodo sismico**, ossia scosse in sequenza che seguono (e a volte precedono) la scossa principale. “Le scosse possono avvenire sia in senso orizzontale (**scosse ondulatorie**) che in senso verticale (**scosse sussultorie**), ma di solito si manifestano contemporaneamente; inoltre una scossa è generalmente seguita da numerose repliche di potenza via via inferiore (**scosse d'assestamento**) e si possono verificare scosse minori prima di quella principale (**scosse premonitrici**). Il punto interno alla terra da cui partono le onde sismiche è detto **ipocentro**; il luogo superficiale che si trova sulla sua verticale, **epicentro**.” (Figura 5.2) (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009).

I terremoti che avvengono nei confini tra le placche si chiamano terremoti **interplacca**, quelli più rari avvengono all'interno delle placche si chiamano terremoti **intraplacca**. La maggior parte dei sismi avvengono in determinate zone situate ai confini tra le varie placche tettoniche (Figura 5.3). Secondo la teoria della tettonica delle placche, la superficie della terra è composta da una dozzina di grandi placche tettoniche che si spostano lentamente a causa di moti convettivi nello strato del mantello. Dal momento che le placche non si muovono uniformemente, spesso esse collidono o slittano lateralmente lungo i bordi (**faglie trasformi**) (CGIL Pesaro, 2012).



Figura 5.1: La chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice, prima (a sinistra) e dopo il sisma del 24 agosto 2016 (a destra) (Fonte: BBC).

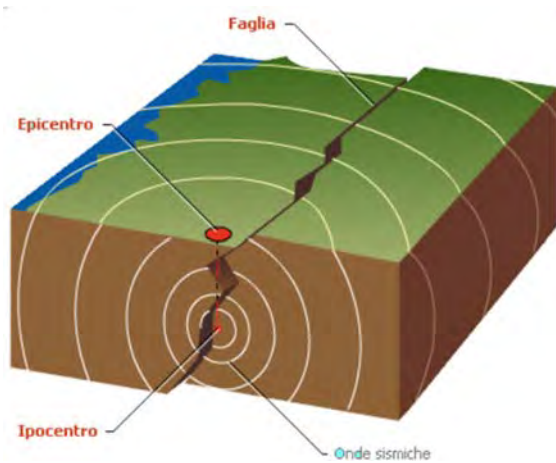


Figura 5.2: L'illustrazione descrive i concetti di ipocentro, epicentro, faglia e onda sismica (Fonte: Wikipedia).

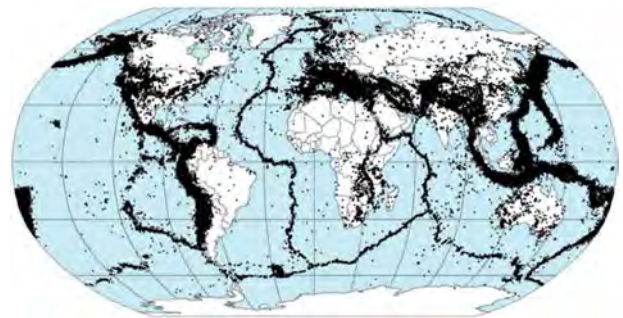


Figura 5.3: Posizione degli epicentri dei 358214 eventi sismici occorsi nel mondo dall'anno 1963 all'anno 1998 (Fonte: National Geographic).

I terremoti sono fenomeni drammatici che, ancora oggi, non è possibile prevedere. Attraverso lo studio del fenomeno e la conoscenza della sismicità storica è invece possibile mitigare gli effetti dei sismi tramite la realizzazione di opere di prevenzione.

5.2 Le scale di intensità e magnitudo

Le scale utilizzate per misurare i fenomeni sismici sono state introdotte quando non esistevano strumenti di misura, e l'unico modo per valutare i terremoti era basarsi sull'osservazione degli effetti da essi causati. La prima scala introdotta è stata la *Mercalli-Cancani-Sieberg* (in sigla MCS), successivamente la *Mercalli Modificata* (MM), e la *Medvedev-Kàrnik-Sponheuer* (MSK), con lo scopo di descrivere la gravità degli effetti del sisma tramite un valore numerico chiamato intensità macrosismica.

5.2.1 La Scala Mercalli

Nel 1902 il sismologo e vulcanologo Giuseppe Mercalli rivide e aggiornò la scala *Rossi-Forel* esponendola alla comunità scientifica. Lo stesso anno il fisico italiano Adolfo Cancani la estese da 10 a 12 gradi. La scala venne poi riscritta dal geofisico tedesco August Heinrich Sieberg e divenne nota come scala Mercalli-Cancani-Sieberg, abbreviata con MCS e detta brevemente Scala Mercalli. La scala valuta i sismi tramite la loro **intensità**, intesa come valutazione degli effetti osservabili sugli elementi antropici e su quelli ambientali. La scala è divisa in 12 gradi di intensità crescente, un grado alto corrisponde a un livello di catastrofe maggiore (Tabella 5.1).

Tabella 5.1: Scala Mercalli: XII gradi riferiti all'entità dei danni provocati dal sisma misurandone l'intensità (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009).

Intensità	Descrizione
I	Rilevata solo dagli strumenti.
II	Avvertita quasi esclusivamente negli ultimi piani delle case, da singole persone particolarmente impressionabili, che si trovino in assoluto stato di quiete.
III	Avvertita da poche persone nelle case, con vibrazioni simili a quelle prodotte da un'autovettura veloce, senza essere ritenuta scossa tellurica, se non dopo successivi scambi d'impressioni.
IV	Avvertita, da molte persone all'interno delle case, e da alcune all'aperto senza però destare spavento, con vibrazioni simili a quelle prodotte da un presente autotreno. Si ha lieve tremolio di suppellettili e oggetti sospesi, scricchiolio di porte e finestre, tintinnio di vetri e qualche oscillazione di liquidi nei recipienti.

- V Avvertita da tutte le persone nelle case e da quasi tutte all'aperto con oscillazioni di oggetti sospesi. Si hanno suoni di campanelli, irregolarità nel moto degli orologi, scuotimento di quadri alle pareti, possibile caduta di qualche soprammobile leggero, lieve sbattimento di liquidi nei recipienti con versamento di qualche goccia, spostamento degli oggetti piccoli, scricchiolio di mobili, sbattere di porte e finestre; i dormienti si destano e qualche persona fugge all'aperto.
- VI Avvertita da tutti con apprensione; parecchi fuggono all'aperto, forte sbattimento di liquidi, caduta di libri e ritratti dalle mensole, rottura di qualche stoviglia, spostamento di mobili leggeri con eventuale caduta di alcuni di essi, suono delle più piccole campane delle chiese; in singole case crepe negli intonaci, in quelle mal costruite o vecchie danni più evidenti ma sempre innocui: possibile caduta di qualche tegola o comignolo.
- VII Considerevoli danni per urto o caduta delle suppellettili, anche pesanti, delle case, suono di grasse campane nelle chiese; l'acqua di stagli e canali s'agita e intorbidisce di fango, alcuni spruzzi giungono a riva; alterazioni dei livelli nei pozzi; lievi frane in terreni sabbiosi e ghiaiosi. danni moderati in case solide, con lievi incrinature nelle pareti, considerevole caduta di intonaci e slittamento della copertura dei tetti; singole distruzioni in case mal costruite o vecchie.
- VIII Piegamento o caduta degli alberi; i mobili più pesanti e solidi cadono e vengono scaraventati lontano; statue e sculture si spostano, talune cadono dai piedistalli. Gravi distruzioni a circa il 25% degli edifici, caduta di ciminiere, campanili e mura di cinta; costruzioni in legno vengono spostate o spazzate via.
- IX Distruzioni e gravi danni a circa il 50% degli edifici. Costruzioni reticolari vengono smosse dagli zoccoli, schiacciate su sé stesse, in certi casi danni più gravi.
- X Distruzioni e gravi danni a circa il 75% degli edifici, gran parte dei quali diroccano; distruzioni di alcuni ponti e dighe; lieve spostamento delle rotaie; condutture d'acqua spezzate; rotture e ondulazioni nel cemento e nell'asfalto; fratture di alcune decimetri nel suolo umido, frane.
- XI Distruzione generale degli edifici e ponti coi loro pilastri; vari cambiamenti notevoli nel terreno numerosissime frane.
- XII Ogni opera dell'uomo viene distrutta, deviazioni di fiumi e scomparsa di laghi.

5.2.2 La Scala Richter

Negli anni '30 del secolo scorso il sismologo statunitense Charles Francis Richter elaborò una scala che, a differenza della scala Mercalli, non valuta i sismi tramite la loro intensità ma tramite la **magnitudo**, intesa come la misura oggettiva della quantità di energia elastica emessa durante il sisma, rilevata attraverso le registrazioni (sismogrammi) degli strumenti (sismografi); questo permette di descrivere il sisma in maniera non dipendente dalla quantità dei danni che lo stesso provoca sull'ambiente antropizzato. L'ampiezza massima della traccia registrata dal sismografo non ha un valore massimo, per questo sarebbe impreciso parlare di "scala". I terremoti più gravi raggiungono magnitudo superiore a 5,5, mentre invece è possibile avvertire un terremoto già a valori di magnitudo di 2,5. "La scala Richter compara la quantità di energia liberata nel punto esatto in cui si è verificato il sisma (detto ipocentro) con l'energia generata da una carica di tritolo fatta esplodere nello stesso punto. Essa è universalmente riconosciuta perché si rivela generalmente più affidabile della scala Mercalli in quanto in quest'ultima (a parità di intensità) gli effetti possono essere diversi a seconda del luogo epicentrale." (CGIL Pesaro, 2012). La scala Richter è attualmente usata in Italia ed è la più diffusa in tutto il mondo (Tabella 5.2).

Tabella 5.2: Scala Richter: 10 gradi di magnitudo (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009)

Grado di magnitudo	Descrizione
0	Sisma molto lieve
2,53	Scossa avvertita solo nelle immediate vicinanze
4-5	Può causare danni localmente
5	Energia pari alla bomba atomica lanciata su Hiroshima nel 1945
6	Sisma distruttivo in un'area ristretta 10 km di raggio
7	Sisma distruttivo in un'area di oltre 30 km di raggio
7-8	Grande sisma distruttivo (magnitudo del terremoto di S. Francisco del 1906)
8,4	Vicino al massimo noto (energia sprigionata dalle scosse 2×10^{25} ergs)
9,5	Massimo valore di magnitudo noto, osservato tra il 1900 e il 2000.

In sintesi possiamo affermare che un evento sismico può essere descritto da un solo valore di magnitudo e da molti valori d'intensità. L'intensità diminuisce man mano che ci allontaniamo dall'**epicentro** del terremoto, ossia la zona più colpita dal sisma; questo si trova immediatamente sopra l'**ipocentro**, ossia il luogo più o meno profondo dove si è verificata la frattura della roccia che dà origine al terremoto. I sismografi non misurano l'intensità di un terremoto ma sono utili per calcolarne la magnitudo, e sono costituiti da un rotolo di carta e da un pennino sospeso da una molla (Figura 5.4); durante il terremoto il rotolo di carta si muoverà seguendo gli spostamenti del terreno, mentre invece il pennino rimarrà fermo poiché la molla smorzerà i movimenti del sisma (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009).

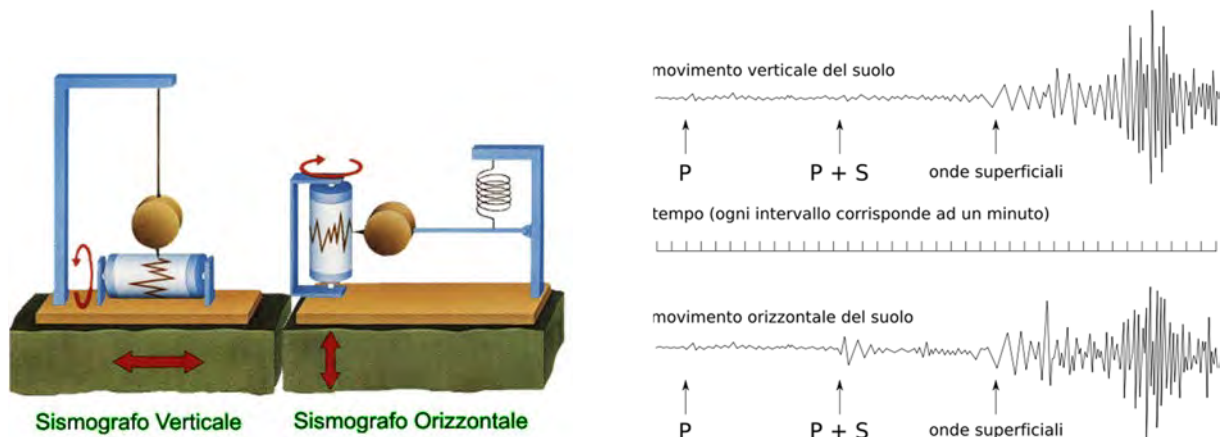


Figura 5.4: a) Rappresentazione schematica di un sismografo (Fonte: www.terremoti.it).

b) Rappresentazione di un sismogramma (Fonte: Wikipedia).

5.3 Il rischio sismico

Nel nostro Paese sono stati fatti molti studi sulla sismicità del territorio; storicamente sull'origine dei terremoti si ritrovano alcuni testi pubblicati dal XV secolo. È però solamente nel XIX secolo che vengono abbandonate interpretazioni fantasiose per lasciare spazio a ricerche scientifiche, grazie anche all'avanzamento della scienza sismologica. Alla fine del XIX secolo grazie alla diffusione di strumenti avanzati fino alla creazione delle reti di monitoraggio nel XX secolo segneranno una pietra miliare nello studio delle caratteristiche sismiche della nostra penisola.

Possiamo definire come **rischio sismico** quel rischio determinato dalla combinazione della pericolosità (frequenza e intensità dei sismi), della vulnerabilità (fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale e produttivo) e dell'esposizione (presenza di patrimonio monumentale, artistico, storico densità abitativa) di un dato territorio o porzione di esso.

Definiamo invece come **sismicità** la forza e la frequenza con la quale si verificano i sismi, ed è una caratteristica intrinseca del territorio. Il rischio permette quindi di quantificare i danni che potrebbero verificarsi non solo in rapporto alla sismicità propria del luogo analizzato, ma anche alla tipologia e resistenza dei manufatti edilizi o infrastrutturali in esso presenti.

La sismicità invece, fornendo la frequenza e l'energia associate ai terremoti, permette di definire la **pericolosità sismica**, intesa come la probabilità che si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco in un dato intervallo di tempo. Valori elevati di pericolosità sismica indicano valori elevati di probabilità che il fenomeno si verifichi. Il valore di pericolosità sismica può essere utilizzato per fare delle considerazioni dal punto di vista della sicurezza di un'opera o di un'infrastruttura, anche in relazione alla sua importanza strategica.

La stima della pericolosità sismica di un territorio può essere fatta tramite un metodo probabilistico o deterministico; quest'ultimo utilizza i dati raccolti durante gli eventi sismici storici in modo da risalire all'entità dai danni verificatisi e analizzare la frequenza del verificarsi dell'evento. Dal momento che questo tipo di approccio richiede una grande quantità di dati storici non sempre disponibili o comunque non valutabili correttamente in maniera oggettiva, si tende ad utilizzare un approccio probabilistico. Attraverso questo approccio, la pericolosità è espressa come la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche. Per questo metodo vengono identificate delle zone sismo genetiche, quantificandone il loro grado di attività sismica e calcolando gli effetti provocati da sismi generati da tali zone sul territorio circostante (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

5.3.1 Le aree sismo genetiche

Al fine di tutelare il patrimonio architettonico del nostro paese e, prima di tutto, salvaguardare le vite umane, lo Stato Italiano ha elaborato delle normative sismiche all'avanguardia rispetto al panorama internazionale. Queste norme prescrivono i criteri progettuali per edifici realizzati in zona sismica, in modo tale da garantire che l'edificio resista a sismi di lieve entità e non collassi a seguito dei sismi più gravi.

Fino al 2003 il territorio italiano è stato suddiviso in "tre categorie sismiche, determinate sulla scorta della frequenza ed intensità storica dei terremoti, che corrispondono a livelli crescenti di protezione per le costruzioni che, costruite od adeguate secondo le norme antisismiche possono così resistere maggiormente e con più efficacia anche scosse di forte intensità" (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009).

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (n. 3274) del 20 marzo 2003 ha poi riclassificato il territorio in quattro "zone sismiche"; tale suddivisione è stata attuata tenendo conto della possibilità che una data area venga colpita in un lasso di tempo (50 anni) da un terremoto che sia superiore a una certa magnitudo o intensità. A ciascuna zona viene assegnato un valore dell'accelerazione sismica in termini di accelerazione massima su roccia (Figura 5.5).

La successiva Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (n. 3519) del 28 aprile 2006 ha portato degli aggiornamenti importanti, grazie a dei nuovi studi svolti dai centri come INGV, ReLUIS e EUCENTRE, introducendo per ciascuna delle 4 zone sismiche l'intervallo di accelerazione di picco (a_g) su terreno rigido con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (Tabella 5.1 e Figura 5.6). Il valore di a_g non è vincolante ai fini della progettazione, infatti secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, entrate in vigore dal 1 luglio 2009, si deve considerare un valore di pericolosità definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

Tabella 5.1: Zone sismiche e relativa accelerazione di picco.

Zona sismica		Accelerazione di picco su terreno rigido con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni
Zona 1	È la zona più pericolosa. Possono verificarsi fortissimi terremoti	$ag > 0,25$
Zona 2	In questa zona possono verificarsi forti terremoti	$0,15 < ag \leq 0,25$
Zona 3	Raramente si verificano forti terremoti	$0,05 < ag \leq 0,15$
Zona 4	È la zona meno pericolosa. I terremoti sono rari	$Ag \leq 0,05$

5.3.2 RAN - Rete Accelerometrica Nazionale

La Rete Accelerometrica Nazionale è un network di 528 postazioni digitali distribuite sul territorio per registrare l'accelerazione del suolo in caso di scuotimento sismico (Figura 5.7). I dati raccolti permettono di valutare le conseguenze sull'edificato e possono aiutare a determinare i parametri sismici da utilizzare nei successivi calcoli strutturali. La rete è presente con maggior densità nelle aree con sismicità elevata, e il suo monitoraggio è affidato al Servizio Monitoraggio Sismico del Territorio - Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento della Protezione Civile. Le postazioni sono dotate di accelerometro, di un ricevitore GPS, di digitalizzatore e di un modem per trasmettere i dati digitalizzati via GPRS (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

5.3.3 OSS - Osservatorio Sismico delle Strutture

L'Osservatorio Sismico delle strutture monitora le oscillazioni sismiche in 149 edifici pubblici (scuole, municipi, ospedali, etc.). I dati raccolti permettono di stimare il danno causato da un terremoto alle strutture monitorate, fornendo una risposta funzionale alla progettazione degli interventi successivi al sisma. Le strutture monitorate sono situate prevalentemente in zona ad alta sismicità (zona 1) e il suo monitoraggio è affidato, come per la RAN, al Dipartimento della Protezione Civile (Figura 5.8). Oltre a valutare il danneggiamento di strutture sensibili per la gestione dell'emergenza sismica, i dati raccolti vengono utilizzati per l'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni, oltre che per studiare il comportamento degli edifici in scenario sismico (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

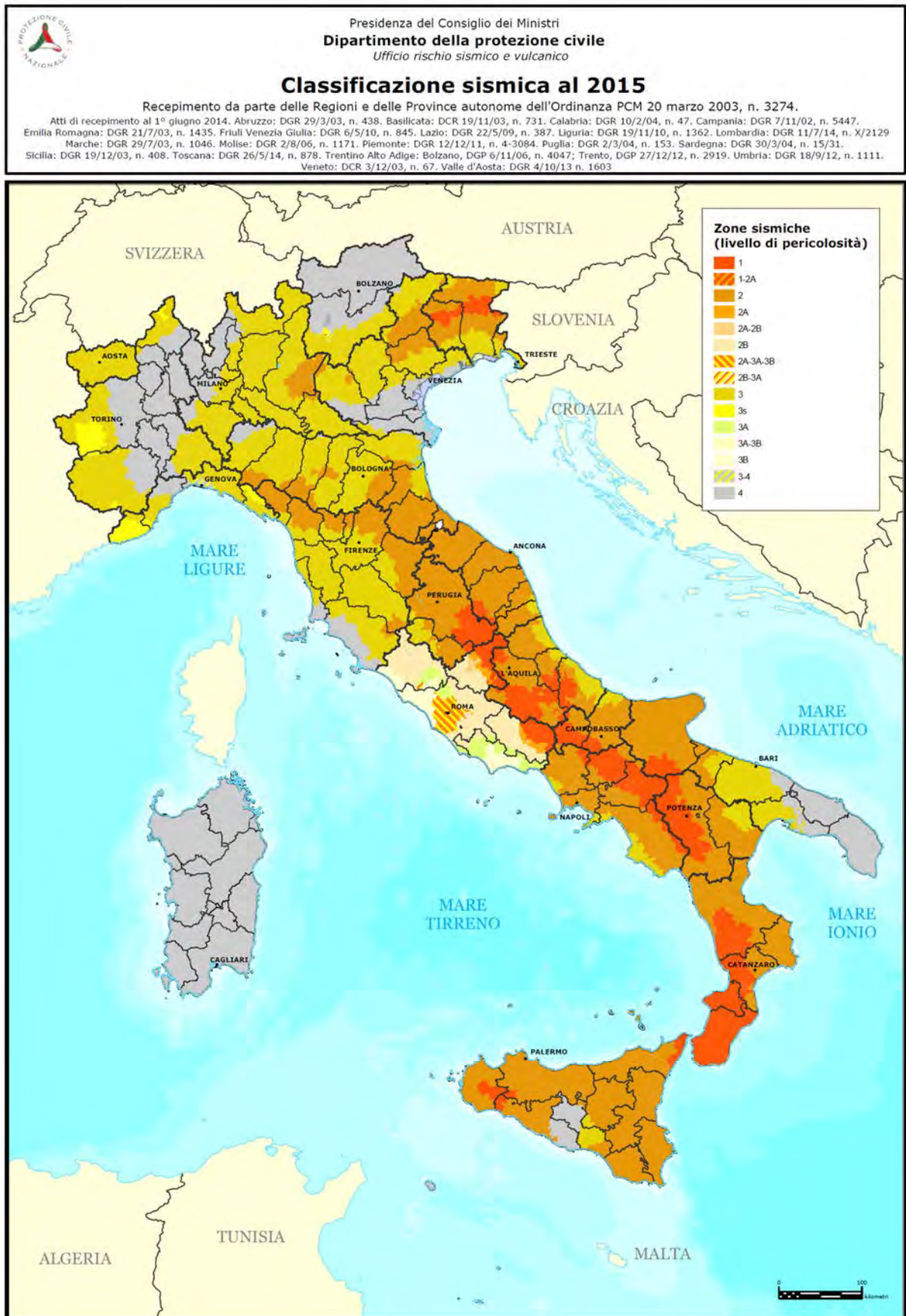


Figura 5.5: Mappa di classificazione sismica per livelli di pericolosità (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).



Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale

(riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b)

espressa in termini di accelerazione massima del suolo

con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

riferita a suoli rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)

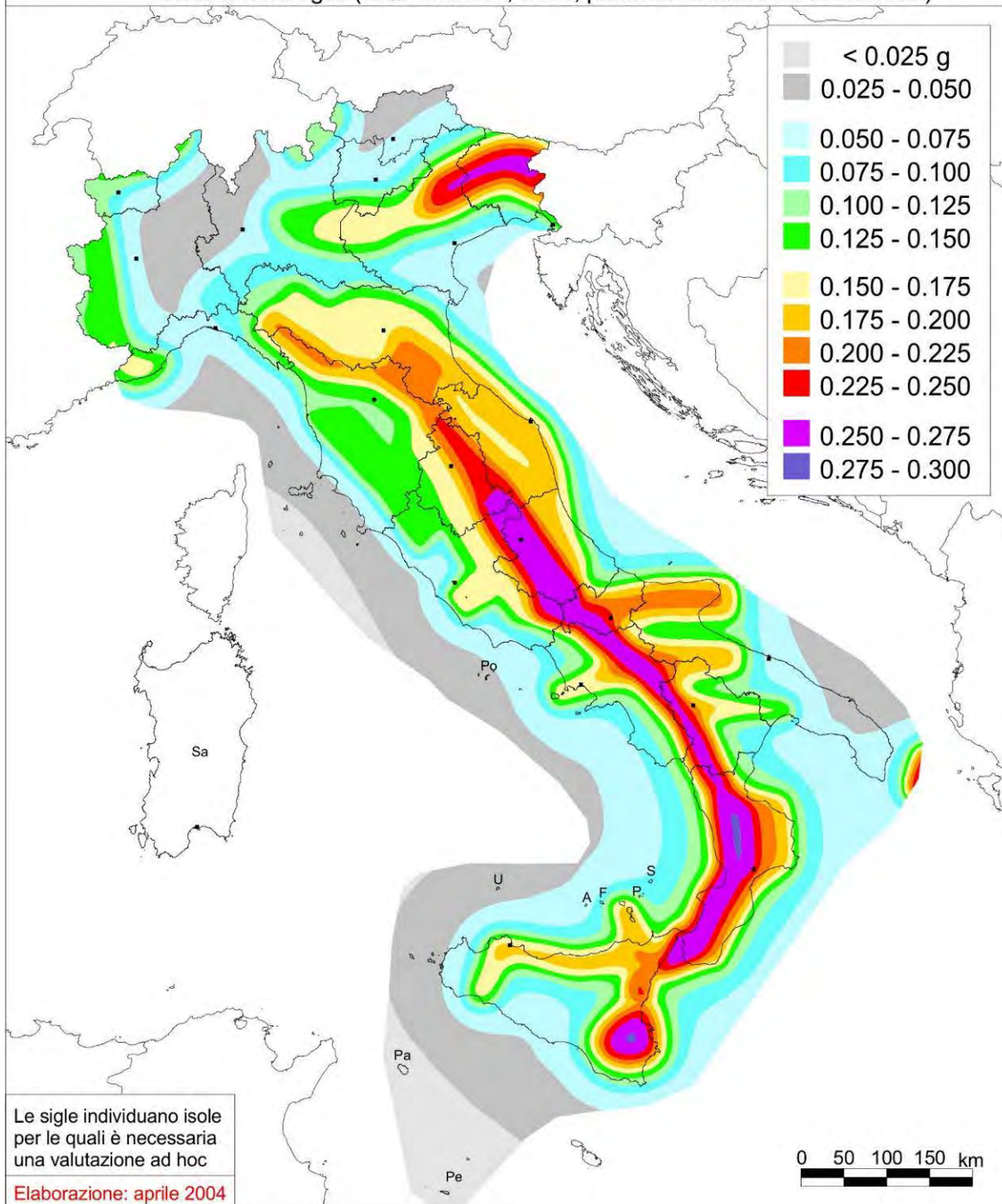


Figura 5.6: Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale (INGV, 2006).



Figura 5.7: Mappa delle stazioni della Rete Accelerometric Nazionale (Dipartimento della Protezione Civile, 2014).

Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)



Figura 5.8: Mappa delle postazioni dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (Dipartimento della Protezione Civile, 2014).

5.4 Storico dei terremoti in Italia

L'Italia è uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo; negli ultimi 2.500 anni è stata teatro di circa 30.000 terremoti di grado superiore al IV (scala Mercalli), e da circa 560 sismi di grado superiore all'VIII. Negli ultimi cento anni invece sono stati sette i terremoti che hanno avuto una magnitudo superiore a 6.5 (scala Richter).

La tabella 5.2 elenca i principali terremoti avvenuti in Italia negli ultimi cento anni. Durante questo arco di tempo, i danni economici causati dai sismi sono stimati a circa 80 miliardi di euro, escludendo i danni al patrimonio monumentale, artistico e storico.

Il fatto che il patrimonio edilizio italiano sia connotato da un'elevata fragilità e da una densità abitativa particolarmente elevata, comporta che il rapporto tra i danni e l'energia rilasciata dai sismi sia molto più alto rispetto a quello che si verifica normalmente in altri Paesi ad elevata sismicità, come ad esempio il Giappone o la California.

“Per la sua particolare posizione geografica, nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella eurasiatica, la sismicità più elevata si concentra nella parte centro-meridionale della Penisola, lungo la dorsale appenninica (Val di Magra, Mugello, Val Tiberina, Val Nerina, Aquilano, Fucino, Valle del Liri, Beneventano, Irpinia), in Calabria e Sicilia e in alcune aree settentrionali, come il Friuli, parte del Veneto e la Liguria occidentale. Solo la Sardegna non risente particolarmente di eventi sismici.” (Dipartimento della Protezione Civile, 2015).

Tabella 5.2: Lista dei maggiori sismi in Italia nell'ultimo centennio (Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009).

Data	Area	Intensità (MCS)	Magnitudo (Richter)	Vittime	Feriti
24/02/1905	Marsica	IX	5,54	-	-
08/09/1905	Calabria	X	7,06	557	2
23/10/1907	Calabria	IX	5,93	167	90
28/12/1908	Calabria	XI	7,24	85.926	14.138
06/07/1910	Irpinia	XI	5,84	50	-
15/10/1911	Monte Etna	X	5,14	13	48
08/05/1914	Monte Etna	X	5,18	69	115

13/01/1915	Fucino	XI	6,99	32.610	-
26/04/1917	Val Tiberina	IX-X	5,74	20	30
29/06/1919	Mugello	IX	6,18	100	400
10/09/1919	Monte Amiata	IX	5,28	1	20
07/09/1920	Lunigiana Garfagnana	X	6,48	171	650
27/03/1928	Friuli	IX	5,67	11	40
23/07/1930	Irpinia	X	6,72	1.778	4.264
30/10/1930	Anconetano	IX	5,94	18	-
26/09/1933	Maiella	IX	5,56	12	150
18/10/1936	Veneto-Friuli	IX	5,88	19	-
03/10/1943	Offida	IX	5,76	-	-
21/08/1962	Irpinia	IX	6,19	17	-
15/01/1968	Belice	X	6,12	231	623
06/05/1976	Friuli	IX-X	6,43	965	3
15/09/1976	Friuli	X-XI	5,91	11	-
15/04/1978	Golfo di Patti	IX	6,06	0	-
19/09/1979	Valnerina	IX	5,88	5	-
23/11/1980	Irpinia-Basilicata	IX-X	6,89	2.914	10
26/09/1997	Umbria-Marche	VIII-IX	5,95	11	circa 100
06/04/2009	Aquilano	IX	5,8	308	circa 1.600
20/05/2012	Emilia Romagna	-	5,9	7	-
20/05/2012	Emilia Romagna	-	5,8	20	-
24/08/2016	Accumoli	-	6,2	299	-
18/01/2017	Abruzzo	-	5,5	29	-

5.5 Analisi di damage assessment multitemporale

Un esempio di applicazione dei metodi e degli strumenti della Geomatica al *disaster management* è la realizzazione di un modello 3D per mappare, visualizzare e misurare i danni occorsi a una struttura in seguito ad un evento sismico.

Nello specifico l'analisi multitemporale per il *damage assessment* è uno dei lavori svolti da un gruppo di ricerca del Politecnico di Torino, nell'ambito delle attività connesse al Disaster Recovery Team (DIRECT), realizzate in collaborazione con il nucleo SAPR dei Vicili del Fuoco per il monitoraggio del complesso medievale della chiesa di S. Agostino ad Amatrice, in seguito ai danni subiti dopo lo sciame sismico del 2017 (Chiabrando, et al., 2017).

Le analisi multitemporali per l'osservazione di fenomeni a lenta evoluzione vengono solitamente effettuate tramite immagini satellitari ad alta risoluzione, fotografie, cartografie e ortofotografie acquisite a distanze di tempo piuttosto lunghe. In questo caso si è provato a fornire uno strumento operativo che potesse generare modelli capaci di fornire informazioni metriche sui danni subiti dalle strutture, in condizioni ambientali in cui difficilmente si sarebbe potuto operare in maniera più vantaggiosa in termini di risorse (tempo, sicurezza, costo).

I dati raccolti, costituiti da immagini aeree e terrestri, sono stati elaborati tramite i software Photoscan, 3Dresaper e Cloud Compare, e restituiti tramite modello 3D navigabile utilizzando il visualizzatore on-line gratuito e open source 3DHOP (Figura 5.9).

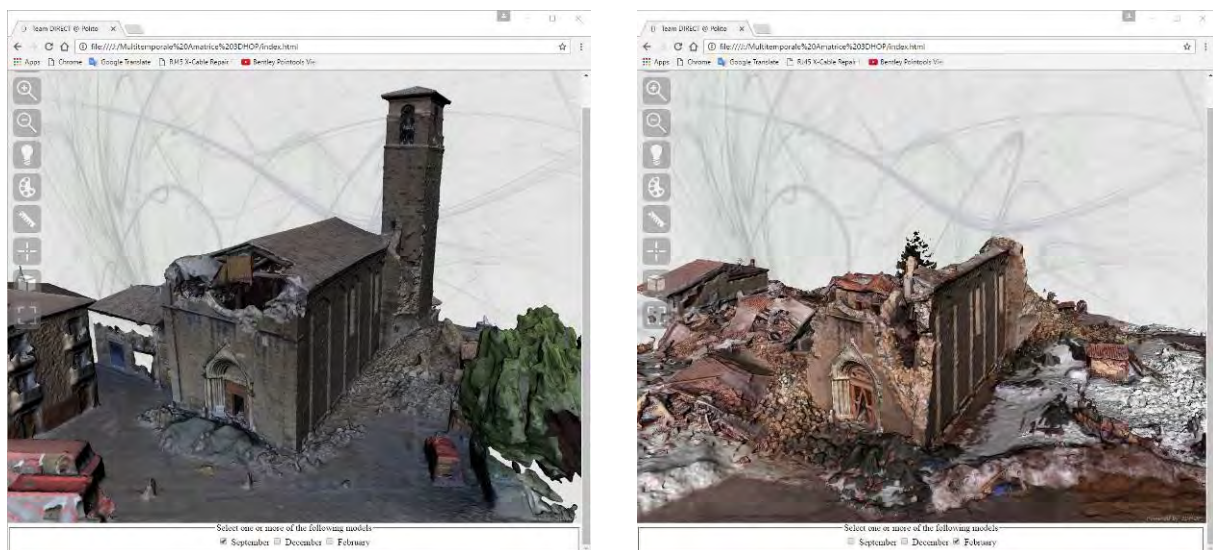


Figura 5.9: La chiesa di S. Agostino ad Amatrice, in una vista multi-temporale nei mesi di settembre (a sinistra) e febbraio (a destra) (Chiabrando, et al., 2017).

5.6 La topografia applicata al soccorso

Alla base delle tipologie di soccorso attuate dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (CNAVVF) vi è, come elemento comune, il territorio. In questo scenario nasce la figura del topografo applicato al soccorso, ed il relativo servizio di Topografia Applicata al Soccorso (TAS). Questi operatori altamente addestrati, forniscono un supporto cruciale nel coordinare le attività di soccorso tramite la redazione di mappe tematiche del territorio mediante l'utilizzo di applicazioni topografiche di software GIS (Figure 5.10 e 5.11).

Il GIS è uno strumento chiave nell'analisi spazio-temporale, poiché provvede una piattaforma per organizzare le informazioni funzionali al *disaster management*. Esso si articola in due fasi; *la prevenzione e la preparazione*. Nella prevenzione il GIS viene ad esempio utilizzato per gestire grandi volumi di dati necessari alla valutazione del rischio; nella preparazione costituisce invece uno strumento per la pianificazione delle vie di fuga, per la definizione dei centri per le operazioni di emergenza, e per l'integrazione dei dati satellitari con altri dati funzionali alla progettazione dei sistemi di allerta (Banerjee, et al., 2009).

Questo nuovo modo di operare sfrutta specifiche applicazioni GPS miste a dispositivi di radio localizzazione in tempo reale, in modo da migliorare le attività di coordinamento, garantendo un supporto decisionale tempestivo funzionale al soccorso tecnico urgente. Tutti gli aspetti riguardanti l'addestramento e il miglioramento tecnologico sono sviluppati dagli ufficiali e dagli agenti del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

“A partire dal sisma Abruzzo nel 2009 fino al sisma Emilia Romagna ed all'emergenza naufragio nave Costa Concordia nel 2012, la funzione TAS è stata sempre attivata sul cratere ed ha permesso di redigere su cartografia digitale mappe tematiche di rilevante importanza anche sotto il profilo della polizia giudiziaria, oltre che quello operativo. La delimitazione delle aree inaccessibili o a viabilità interdette, la mappatura dei percorsi effettuati dal personale VVF impegnato in operazioni di ricerca dispersi sono solo alcuni esempi applicativi del servizio TAS in ambito emergenziale.” (Cuzzocrea & Priori, 2014).

Recentemente il TAS è stato potenziato grazie all'adozione di sistemi per la geolocalizzazione che permettono di osservare le forze dei VVF e i mezzi operativi in tempo reale in tutta Italia. Ciascun operatore e veicolo è munito di sistemi radio che inviano ai kit per la geolocalizzazione delle squadre TAS informazioni sulle coordinate tramite una stringa di dati NEMEA.

“Il kit TAS è costituito essenzialmente da una valigia portatile con radio VVF con interfaccia USB di codifica stringa NEMEA e da software per la geolocalizzazione e interrogazione degli

apparati radio. Il software di geolocalizzazione trasferisce i dati al GIS Ozi Explorer, garantendo al TAS il controllo e il coordinamento di diverse unità dispiegate su uno scenario operativo, in caso di attività emergenziali, o sul territorio in caso di attività ordinarie. Tale kit consente la localizzazione immediata dei veicoli e personale VVF che ricade nell'ambito di copertura del ponte radio. Tale sistema consente da tutta Italia di geo riferire i mezzi e il personale VVF, permettendo un'attività di controllo, monitoraggio e coordinamento a diversi livelli (provinciale, regionale, nazionale).” (Cuzzocrea & Priori, 2014)

Esistono due tipi di percorsi formativi per gli operatori VVF: TAS1 è un'abilitazione base prevista da alcuni anni per tutto il personale operativo, e permette all'operatore la corretta interpretazione dei dati geomatici; TAS2 è il livello più avanzato che permette anche il processamento dei dati acquisiti e trasmessi dal TAS1, geo riferire carte digitali e tematiche, realizzare mappe di tipo dedicato per il supporto decisionale nelle operazioni di soccorso (Figure 5.12 e 5.13), svolgendo compiti di raccordo, acquisizione ed elaborazione di tutti i dati geomatici correlati allo scenario operativo.



Figura 5.10: Elaborazione della situazione dei fabbricati durante il terremoto dell'Aquila nel 2009 (Cuzzocrea & Priori, 2014).



Figura 5.11: Elaborazione cartografica della viabilità del Centro de L'Aquila durante il terremoto del 2009 (Cuzzocrea & Priori, 2014).

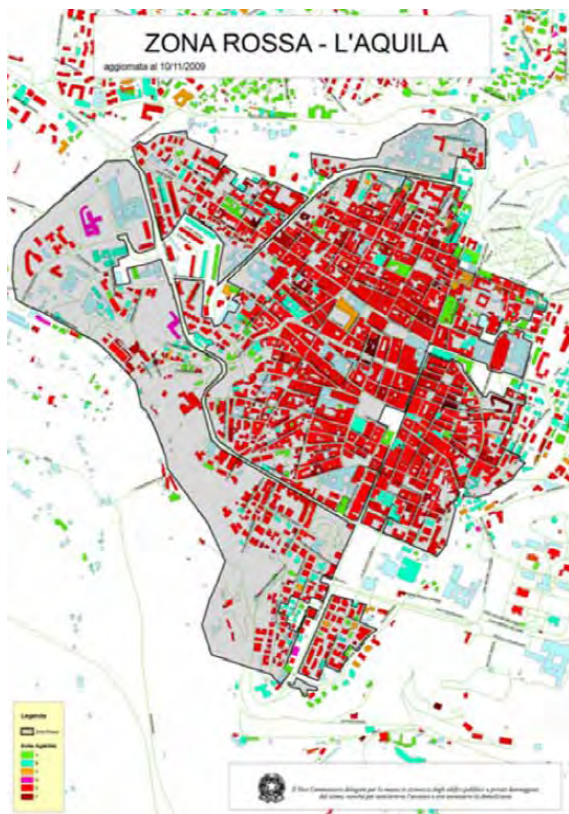


Figura 5.12: Mappatura di agibilità nella “zona rossa” del centro storico dell’Aquila (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.13: Perimetrazione delle zone interdetto alla circolazione nel centro storico dell’Aquila (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

6. Gli interventi urgenti di messa in sicurezza e i cantieri di ricostruzione nei luoghi del terremoto

I cantieri di ricostruzione e gli interventi urgenti messa in sicurezza nei luoghi colpiti dal terremoto richiedono un'attenzione particolare per la tutela dei lavoratori, per i quali abbiamo già illustrato statisticamente l'elevata incidenza infortunistica. Gli interventi di rimozione macerie, messa in sicurezza, consolidamento degli edifici e ricostruzione degli stessi comportano, data la precarietà e l'urgenza degli interventi, rischi lavorativi ancora più importanti rispetto ad un cantiere normale.

Possiamo definire due tipi di cantieri post sisma:

La prima tipologia riguarda i cantieri in cui vengono eseguiti **lavori di ricostruzione**; possono essere definiti cantieri edili ordinari e quindi realizzati seguendo i dettami del D.lgs. 81/08 e s.m.i., il cd. Testo Unico per la sicurezza sul lavoro. Per questa tipologia i riferimenti essenziali sono le *Indicazioni per la realizzazione in sicurezza di interventi su edifici danneggiati dal Sisma* del Servizio Sanitario Regionale Emilia Romagna e le linee guida della CGIL di Pesaro.

La seconda tipologia riguarda i cantieri in cui vengono eseguiti **interventi urgenti di messa in sicurezza**, tali interventi hanno luogo immediatamente dopo l'evento sismico e i lavori sono coordinati dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e dalla Protezione Civile. L'intervento è di solito immediato e volto ad evitare incidenti causati da ulteriori crolli per mezzo di strutture provvisorie. Il *Manuale delle Opere Provvisorie – L'intervento tecnico urgente in emergenza sismica* e il relativo *Vademecum STOP – schede tecniche delle opere provvisorie* per la messa in sicurezza post sisma da parte dei Vigili del Fuoco costituiscono riferimento essenziale per questa parte.

In questo capitolo accenneremo inizialmente alla tipologia di cantieri riguardante i lavori di ricostruzione post sisma, richiamando le metodologie di prevenzione, i piani di emergenza e i principali strumenti progettuali per la riduzione dei rischi. Successivamente verranno analizzati gli interventi urgenti di messa in sicurezza, con approfondimenti riguardo la gestione della sicurezza degli operatori e le operazioni pratiche di posa di un'opera provvisoria.

6.1 I cantieri di ricostruzione post sisma

“Le attività di ricostruzione nelle zone interessate dal sisma richiedono, per complessità e straordinarietà degli interventi, una particolare attenzione al tema della tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori del comparto edile, che notoriamente è già connotato da un’elevata incidenza di infortuni gravi. Gli interventi di demolizione, rimozione di materiali contenenti amianto, messa in sicurezza e consolidamento degli edifici, e più in generale di ricostruzione, comportano infatti, in un contesto caratterizzato dall’urgenza e dalla precarietà, rischi lavorativi ancor più rilevanti rispetto a quelli già presenti nell’edilizia tradizionale. La Legge 122 del 1 agosto 2012, di conversione con modificazioni del Decreto Legge n. 74 del 6 giugno 2012, recante interventi urgenti in favore delle popolazioni colpite dagli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, prevede inoltre la messa in sicurezza degli edifici industriali, attraverso appositi interventi per eliminare le eventuali carenze strutturali ai fini dell’ottenimento di agibilità sismica.” (Servizio Sanitario Regionale Emilia-Romagna).

6.1.1 La sicurezza dei lavoratori in caso di terremoto: i piani di emergenza

Il sisma è un evento pericoloso grave ed immediato che impone l’abbandono del sito; pertanto deve essere previsto dal Piano di Emergenza del cantiere, come previsto dal titolo I sez. VI inerentemente agli obblighi del datore di lavoro. La prevenzione relativa all’emergenza sismica e le misure da attuare in caso di terremoto devono essere adeguate al numero di persone presenti, al tipo di lavoro svolto e alle dimensioni del cantiere (Bragadin, 2013).

“Il compito del datore di lavoro, RSPP e MC è quello di aumentare la conoscenza e la consapevolezza dei rischi e dei comportamenti in grado di ridurli, anche in relazione ad un fenomeno naturale, così difficilmente prevedibile, come un terremoto.” (CGIL Pesaro, 2012).

Lo strumento fondamentale per la prevenzione nei cantieri in caso di evento sismico è la redazione del Piano di Emergenza ed evacuazione (contenuto obbligatoriamente ai sensi del allegato XV del D.lgs. 81/08 nel Piano di Sicurezza e Coordinamento redatto dal Coordinatore per la sicurezza). Questo documento è un mansionario che indica le procedure comportamentali da seguire in caso di pericolo per tutti i lavoratori. La pianificazione dell’esodo è l’elemento fondamentale del piano, ed è compito del safety manager predisporre un sistema di vie di uscita del cantiere che consenta un rapido esodo in caso di terremoto (Bragadin, 2013).

6.1.2 Metodologie di prevenzione

Alcuni strumenti progettuali utili al fine di ridurre i rischi nei cantieri di ricostruzione post sismica sono i diagrammi spazio-tempo, la mappatura dei rischi nel layout di cantiere e il cronoprogramma operativo. Questi strumenti permettono di analizzare i rischi specifici in modo efficiente, soprattutto per quanto riguarda le demolizioni.

6.1.2.1 I diagrammi spazio-tempo e la Location Breakdown Structure

“I diagrammi spazio-tempo (o diagrammi a ferrovia) sono grafici che consentono di rapportare l’esecuzione delle attività in relazione alla localizzazione di svolgimento della stessa. Per le opere puntuali si tratta normalmente di grafici che riportano in ordinata lo spazio, ad esempio i vari piani dell’edificio, ed in ascissa il tempo di esecuzione. La scelta di un metodo di programmazione più dettagliato, come il diagramma tempo/spazio integrato con i rischi (Figura 5.14), costituisce certamente un supporto importante per l’attività gestionale e di prevenzione del cantiere.” (Bragadin, 2008).

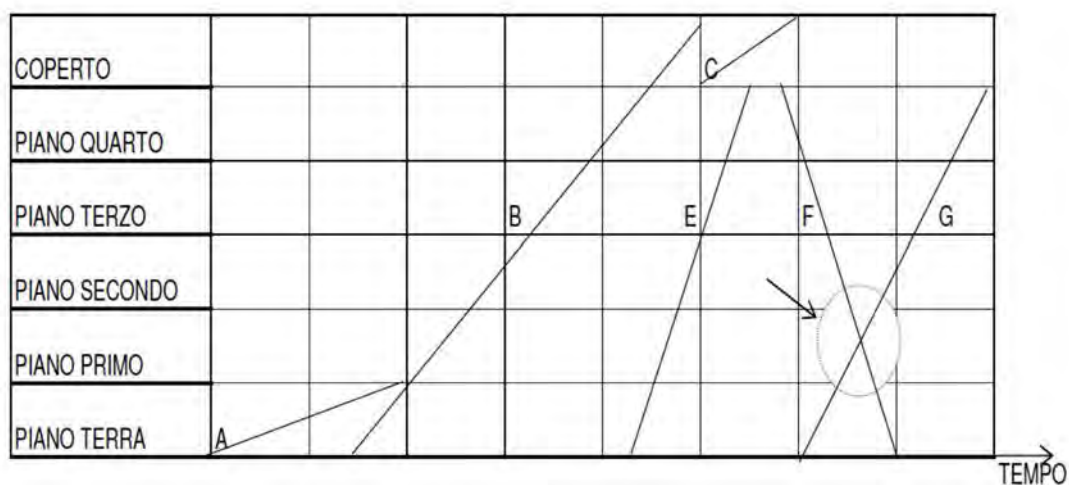


Figura 5.14: Diagramma spazio-tempo per opera puntuale (Bragadin, 2013).

6.1.2.2 La mappatura dei rischi nel layout del cantiere

Una metodologia per aumentare la sicurezza degli operatori, poco impiegata nel settore edile, è il processo di mappatura dei rischi nel layout di cantiere. Questo metodo coinvolge, in un processo partecipativo, tutte le figure addette al cantiere, al fine di analizzare e localizzare i rischi tramite una planimetria opportuna (Figura 5.15). Il layout costituisce un documento che tutti gli operatori possono capire e usare per studiare i rischi in modo efficace.

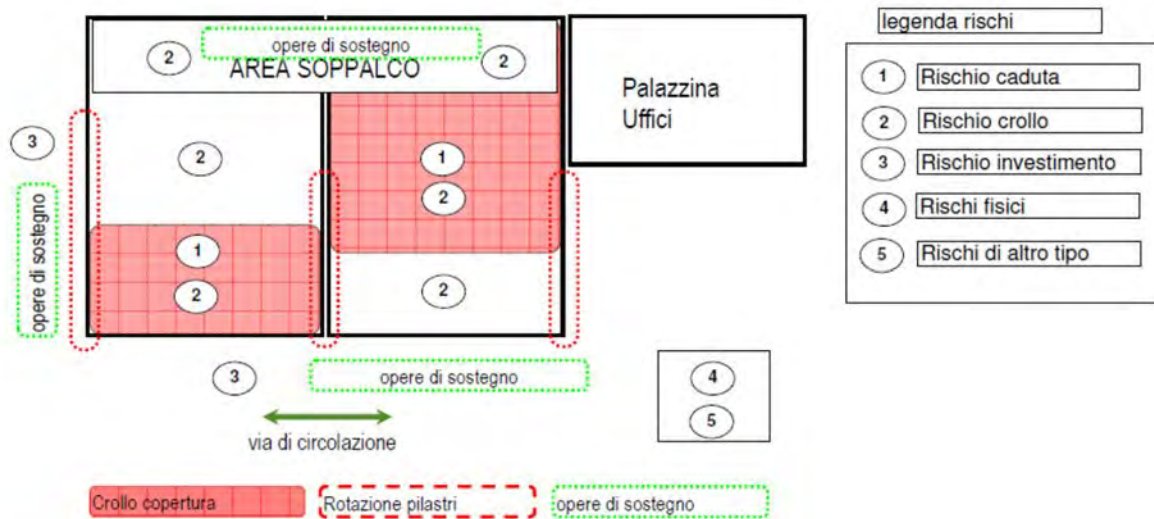


Figura 5.15: Esempio di mappatura dei rischi in cantiere riguardante un caso studio di un edificio danneggiato dal sisma nel 2012 (Bragadin, 2013).

6.1.2.3 Il cronoprogramma operativo

Il cronoprogramma costituisce la descrizione della sequenza delle fasi di lavoro. Esso può essere rappresentato nella sua forma standard tramite un diagramma di Gantt (Figura 5.16), o “in base alle localizzazioni delle attività e tenendo conto della mappatura dei rischi nel layout con un diagramma Flow Line (Figura 5.17), basato sulla Location Breakdown Structure ed integrato con i fondamentali rischi per le localizzazioni” (Bragadin, 2013).

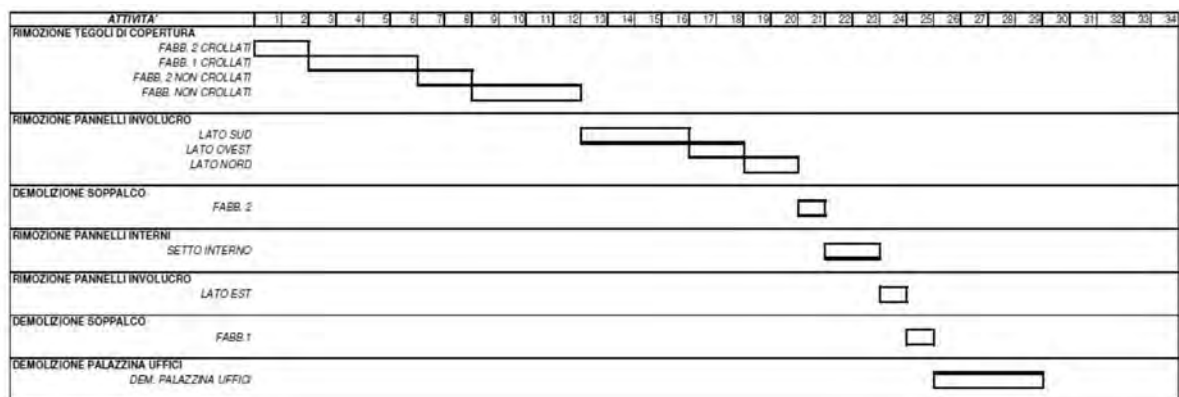


Figura 5.16: Diagramma di Gantt per la fase di demolizione (Bragadin, 2013).



Figura 5.17: Programma delle demolizioni con il diagramma flow-line con rischi fondamentali (Bragadin, 2013).

6.2 Gli interventi urgenti di messa in sicurezza

È compito dei Vigili del Fuoco, in coordinamento con il Dipartimento della Protezione Civile, effettuare le verifiche del danno e dell'agibilità delle strutture colpite dal sisma, oltre ovviamente alla messa in sicurezza del patrimonio storico e artistico pubblico e privato danneggiato.

Le opere provvisorie hanno non solo lo scopo di mettere in sicurezza gli edifici e ristabilire la circolazione veicolare e pedonale, ma anche quello di poter soccorrere i civili e recuperare gli effetti personali, permettendo anche l'accesso ad altri soggetti, come ad esempio i tecnici impegnati nella catalogazione e nel restauro dei beni.

“L'attenzione ed il rigore messo in campo nell'occasione del terremoto abruzzese si sono concretizzati in opere provvisorie pregevoli per esecuzione ma soprattutto per concezione. In essi si realizza l'idea che la messa in sicurezza non debba solo preservare l'opera e l'incolumità delle persone, ma anche la fruibilità interna e, soprattutto, quella dell'ambiente circostante, condizione essenziale per le successive operazioni di recupero in sicurezza definitivo dell'opera in esame e di quelle circostanti, attraverso la riparazione e il rafforzamento” (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Sotto l'aspetto della sicurezza degli operatori e delle caratteristiche dell'opera stessa, realizzare una struttura provvisoria in un cratere sismico è un'attività ben diversa da quanto avviene in situazioni ordinarie; anche se l'opera è intrinsecamente concepita per resistere alle sollecitazioni successive, la sicurezza degli operatori rappresenta un fattore importante e delicato. Durante tali operazioni, i vigili sono esposti a rischi aggiuntivi rispetto a quelli presenti in uno scenario operativo normale, derivanti da pericoli di caduta di elementi edilizi o di crollo di fabbricati prospicienti le strade; di conseguenza questi interventi non possono essere assimilati a quelli che avvengono nei cantieri di ricostruzione, ma sono da classificare come aree operative a tutti gli effetti, e richiedono pertanto una gestione simile a quella adottata nelle operazioni di soccorso tecnico urgente. Il personale deve adottare tutte le misure di tutela della salute e della sicurezza emanate dal CNVVF tramite strumenti come manuali addestrativi, corsi, procedure operative e disposizioni interne.

“Questo trova riscontro nella nota n. 4060/5001 del 27.05.2009 del Ministero dell'Interno – Dipartimento dei Vigili del Fuoco Soccorso Pubblico e Difesa Civile – Ufficio Dirigente Generale Capo del CNVVF, dove si specifica che un luogo dove il personale VVF opera per la realizzazione di un'opera provvisoria o per un intervento di demolizione, non rientra nel campo d'applicazione del Titolo IV (Cantieri Temporanei o Mobili) del Decreto Legislativo 9

aprile 2008 n. 81 e s.m.i. [...] Nelle aree operative riservate, inoltre, la vigilanza sul rispetto della legislazione vigente in materia di tutela della sicurezza e salute nei luoghi di lavoro viene svolta esclusivamente dai servizi sanitari e tecnici dell'Ufficio Centrale Ispettivo del Dipartimento Vigili del Fuoco ai sensi dell'art 13 comma 1 bis del D.Lgs 81/2008. Per mitigare il rischio da interferenze nel caso di operazioni effettuate congiuntamente a personale e mezzi di ditte private, la già richiamata Procedura NCP e la relativa nota ministeriale prescrivono che il responsabile delle Operazioni di Soccorso dei Vigili del Fuoco adotti idonei provvedimenti atti ad evitare che il personale delle ditte esterne venga esposto a pericoli e acceda in aree interdette, in relazione allo specifico incarico per il quale lo stesso è chiamato ad operare” (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

In scenari di simile precarietà è necessario tenere conto di aspetti che interessano la sicurezza durante tutte le fasi realizzative, velocizzando e standardizzando le operazioni di consolidamento strutturale, considerando sia gli avvicendamenti tra le squadre operanti sia la possibilità, in alcune fasi, del ripetersi di scosse anche violente.

“L'intervento realizzativo nella fase di emergenza sismica comporta dunque, per gli operatori, criticità molto maggiori di quelle associate a realizzazioni effettuate a distanza di molti mesi o anni dalla scossa principale. Questo richiede necessariamente l'adozione di soluzioni e tecniche realizzative che, a parità di risultato finale, consentano di salvaguardare la sicurezza degli operatori.” (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

I danni causati dal sisma spesso compromettono non solo le condizioni di sicurezza e agibilità dell'edificio, ma anche la transitabilità delle vie; in questo senso la standardizzazione degli interventi permette di dare una risposta più veloce a un problema di emergenza molto complesso. Una strategia fondamentale per la riduzione dei rischi operativi è **la riduzione del tempo di permanenza degli operatori nelle aree pericolose**; di conseguenza la rapidità con cui devono essere eseguiti i lavori comporta una maggiore esigenza nell'adottare precauzioni rispetto alle operazioni svolte in circostanze ordinarie; è necessario “semplificare la fase realizzativa (preparazione e montaggio) cercando, per quanto possibile, di operare in condizioni di sicurezza preferendo il preassemblaggio dell'opera, o di parti di essa, in zona di sicurezza” (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Il Manuale e il Vademecum STOP sono stati elaborati per codificare e standardizzare le opere provvisorie, permettendo la loro realizzazione in una zona sicura, anche lontana dalla sede in cui dovranno essere collocate.

6.2.1 Il Manuale Opere Provvisionali e il Vademecum STOP

Il Manuale Opere Provvisionali e il Vademecum STOP (Schede Tecniche Opere Provvisionali) sono l'esito di un percorso che ha guidato i Vigili del Fuoco durante la messa in sicurezza del patrimonio monumentale ed edilizio dopo il sisma abruzzese del 2009. In tale occasione fu anche costituito il Nucleo di Coordinamento delle Opere Provvisionali (NCP), oggi Nucleo Interventi Speciali (NIS), con lo scopo di coordinare la progettazione delle soluzioni tecniche standardizzate, in modo da capitalizzare il patrimonio di esperienza accumulato negli anni dai Vigili negli scenari di emergenza.

Le schede sono utilizzabili sul campo dagli operatori in modo tale da poter avere non soltanto uno strumento pronto all'uso ma poter raccogliere e valorizzare tutte le proposte di miglioramento dei tecnici che le utilizzavano.

Il manuale Opere Provvisionali viene proposto non solo come un punto di arrivo dopo l'esperienza aquilana, ma anche come punto di partenza per un "nuovo approccio alla messa in sicurezza post sisma da parte dei Vigili del Fuoco" ed è oggetto di studi e di miglioramenti da parte dell'Osservatorio tecnico, istituito con il preciso mandato di migliorare l'uniformità degli interventi di messa in sicurezza, anche con funzione di affinamento finalizzata alla formazione degli operatori (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Nel redigere le schede del Vademecum sono state considerate tutti i riferimenti tecnici disponibili in relazione alle esigenze dei vigili. I calcoli sono stati schematizzati, tenendo sempre un ampio margine di sicurezza, fornendo tabelle di semplice consultazione, senza formule complesse ed a favore della standardizzazione degli interventi (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Le schede STOP costituiscono un importante strumento operativo a supporto degli interventi di soccorso tecnico urgente; le schede semplici permettono di intervenire in maniera diretta applicando le tabelle di predimensionamento fornite a partire dalle caratteristiche geometriche e di danneggiamento della struttura, Le schede articolate invece forniscono diverse soluzioni da intraprendere, tenendo conto della geometria (in questo caso più complessa), delle difficoltà tecniche di realizzazione non standardizzabili e delle condizioni di carico del singolo caso.

6.2.2 La gestione della sicurezza degli operatori

Le schede di intervento presenti nel Vademecum contengono, oltre agli schemi di realizzazione delle opere, informazioni dettagliate sulle criticità operative di ogni tipologia di intervento (Figura 5.18).

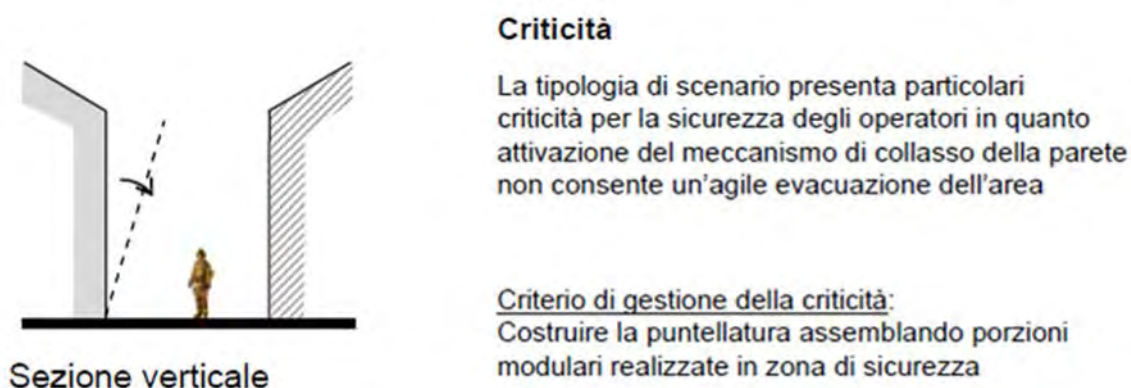


Figura 5.18: Vengono evidenziate le criticità relative al rischio degli operatori dovuto alla permanenza in prossimità della parete da puntellare (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Al fine della salvaguardia degli operatori, il NIS (allora NCP) ha emanato una *procedura operativa per la realizzazione di opere provvisoriale e demolizioni per la messa in sicurezza degli edifici in fase di emergenza sismica*:

“La procedura definisce il campo di applicazione, le esclusioni e la linea di comando e controllo per l’attuazione delle operazioni in condizioni di sicurezza. Sono ad esempio esclusi dai compiti dei VVF il trasporto di detriti e dei materiali di risulta alle discariche in quanto tali operazioni richiedono mezzi e permessi specifici” (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

All’interno della procedura si identificano le varie figure coinvolte nel processo di gestione della sicurezza degli operatori; esse sono il DTS (Direttore Tecnico dei Soccorsi) e il ROS (Responsabile Operativo del Soccorso), che operano secondo quanto schematizzato nel Grafico 6.1.

La procedura include anche ulteriori contenuti come ad esempio il “Piano Operativo di intervento per la realizzazione di opere provvisoriale e per le demolizioni”, le “Istruzioni operative” e i compiti del ROS, secondo quanto schematizzato nel Grafico 6.2.

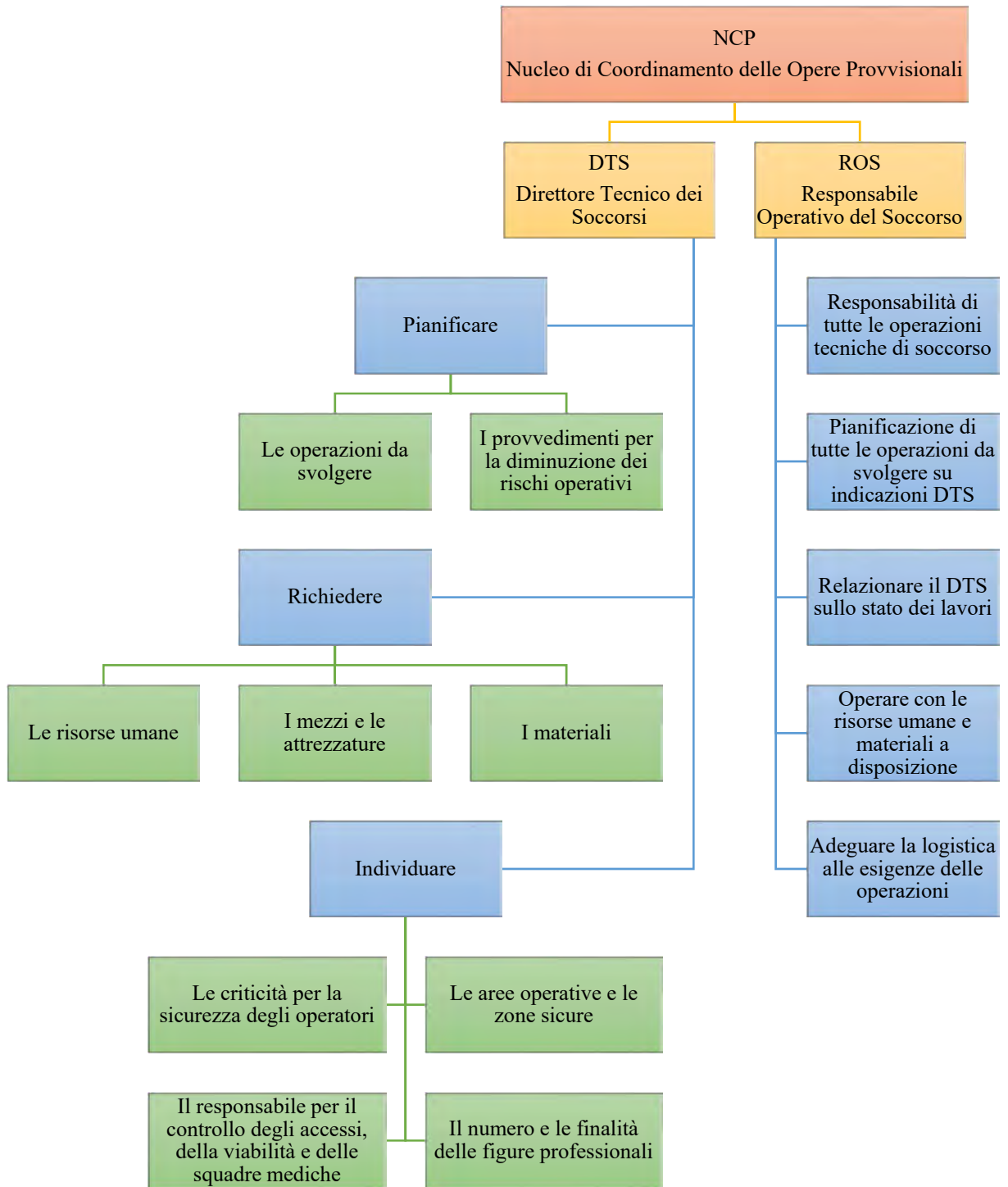


Grafico 6.1: Rielaborazione schematica delle procedure operative e di gestione della sicurezza degli operatori.

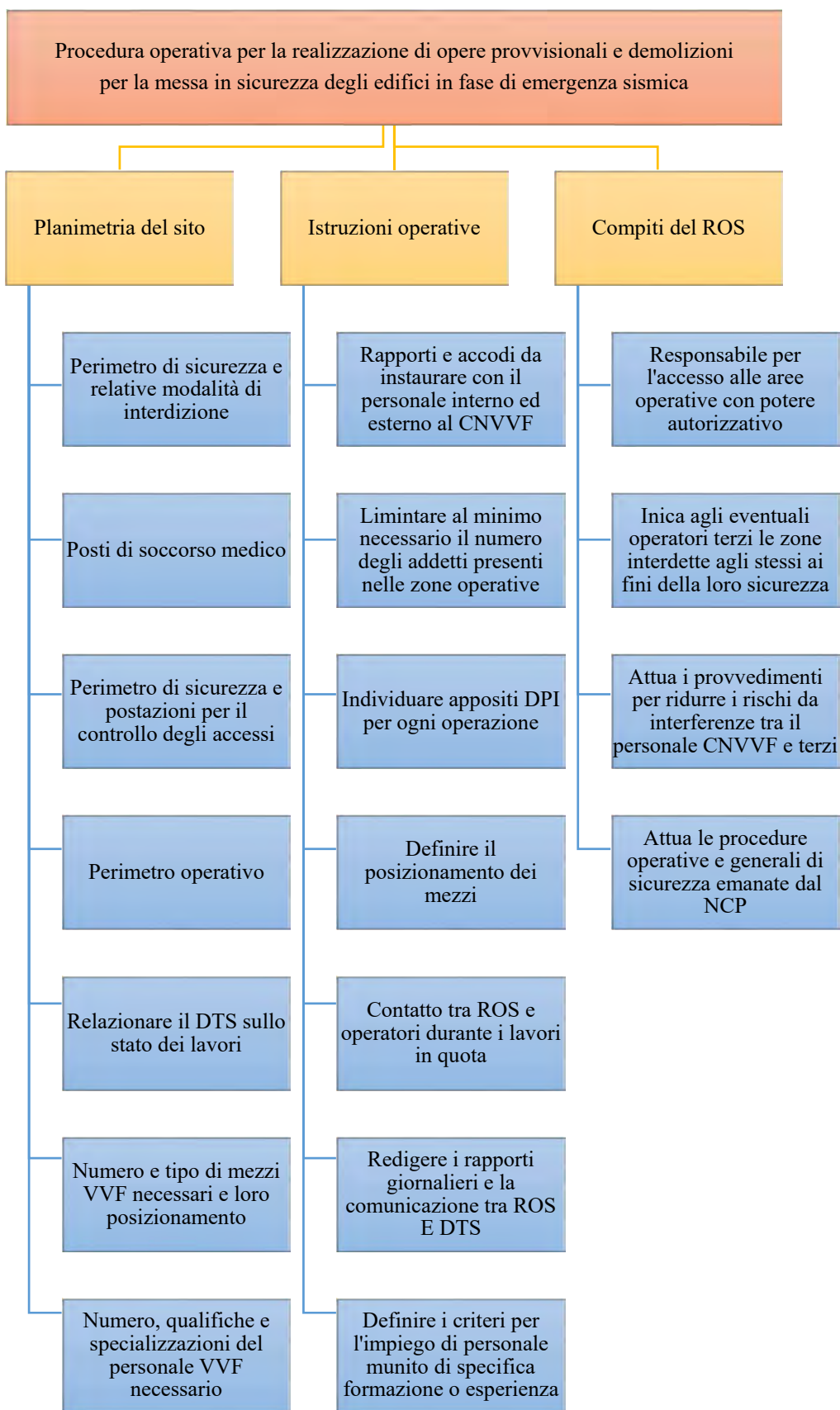


Grafico 6.2: Rielaborazione schematica dei contenuti della procedura operativa per la realizzazione di opere provvisorie e demolizioni per la messa in sicurezza degli edifici in fase di emergenza sismica.

6.2.3 Operazioni pratiche di posa in opera di una struttura provvisoria

Vengono di seguito illustrate le procedure operative pratiche di posa in opera di strutture provvisorie semplici (ossia progettate tramite l'applicazione delle schede STOP); in questo caso è stata presa in esame la posa in opera di sbadacchiature installate sulle aperture al piano stradale di un edificio sito in Via Sibilla, nel comune di Visso (MC). Vengono analizzate in particolari le operazioni di rilievo metrico funzionali al corretto dimensionamento degli elementi.

Un set di attrezzatura indispensabile per la realizzazione delle opere provvisorie è fornita in dotazione al carro standard, secondo quanto definito dai Comandi provinciali dei Vigili del Fuoco di Alessandria e Vercelli in collaborazione con l'Area II della Direzione centrale per l'Emergenza e il Soccorso Tecnico.

Oltre ad attrezzi per foratura, avvitatura, taglio, demolizione, saldatura, attrezzatura edile in genere e materiale di consumo, si riporta in seguito la dotazione relativa alle operazioni di misurazione (Tabella 6.1) e quella relativa a DPI e all'attrezzatura di sicurezza (Tabella 6.2). "Le attrezzature sono state pensate per essere caricate entro casse di contenimento pallettizzabili da trasportare in apposito container scarrabile da 6 metri ovvero in container aviotrasportabile" (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Tabella 6.1: Attrezzatura per misurazione e predisposizione tagli in dotazione al carro opere provvisorie dei Vigili del Fuoco.

Quantità	Elemento
1	Squadra con cappello
2	Squadre a geometria variabile
10	Metri a nastro
5	Rotelle metriche
4	Livelli varie misure
2	Filo a piombo
1	Misuratore laser

Tabella 6.2: Attrezzatura di sicurezza in dotazione al carro opere provvisionali dei Vigili del Fuoco.

Quantità	Elemento
10	Caschetti con mentoniera
10	Nastri segnaletici
1	Scatola guanti monouso
3	Paia di occhiali di sicurezza
1	Scatola di mascherine antipolvere
4	Cartelli segnaletici pericolo
2	Supporti e 2 basi cartellonistica
2	Estintori
1	Cassetta primo soccorso
2	Cuffie antirumore
1	Maschera per saldature

Per la realizzazione di una sbadacchiatura per un'apertura sul piano stradale, gli operatori procedono prima al rilievo delle caratteristiche geometriche dell'elemento architettonico (Figura 5.19), successivamente alla realizzazione dei vari elementi mediante attrezzatura che viene trasportata in sito (Figura 5.20). Qualora, dopo la realizzazione degli elementi, le dimensioni fossero ancora non perfettamente coerenti con quelle dell'apertura, gli elementi vengono agevolmente modificati mediante l'attrezzatura di cui sopra.

In alcuni casi si verifica invece l'esigenza di preassemblare a terra le opere provvisionali, e successivamente portarle in quota e posarle in opera, come nel caso delle sbadacchiatura delle finestre della Chiesa San Giovanni (Castelvecchio di Preci) in Figura 5.21. Qualora le dimensioni non risultassero coerenti con l'apertura, è necessario riportare a terra l'elemento per le opportune modifiche, o modificarlo in quota con l'impiego di attrezzature leggere (Figura 5.22).

È in questo caso che si configura lo scenario di utilizzo dei sistemi di remote sensing (ad esempio fotogrammetria da drone); tali metodologie possono ridurre i tempi di esposizione degli operatori ai rischi di permanenza in zone pericolose durante le operazioni di rilievo, eliminando il tempo legato alla modifica in quota di elementi non sufficientemente precisi.



Figura 5.19: L'operatore misura la soglia di un'apertura avvalendosi di un metro a nastro (Fonte: Canale Youtube VVF).



Figura 5.20: L'elemento ligneo della sbadacchiatura viene realizzato tramite sega da banco circolare (Fonte: Canale Youtube VVF).



Figura 5.21: Posa in opera di sbadacchiatura preassemblata a terra (Fonte: Canale Youtube VVF).



Figura 5.22: La sbadacchiatura viene regolata in quota con l'impiego di una sega a mano (Fonte: Canale Youtube VVF).

In caso di geometrie più complesse di una semplice apertura, come ad esempio archi o superfici voltate, i moderni metodi della Geomatica forniscono una precisione maggiore e una esposizione al rischio minore rispetto ai tempi richiesti dalle operazioni di rilievo metrico tradizionale.

L'adozione di questi metodi va a ridurre al minimo la necessità di un sopralluogo preliminare condotto in prima persona per il rilievo delle caratteristiche geometriche del manufatto, soprattutto negli scenari che richiedono operazioni in quota o in contesti di sicurezza precaria.

È importante comunque evidenziare che la riduzione dei tempi di esposizione degli operatori per le operazioni di rilievo è solamente una delle varie procedure volte ad aumentare la sicurezza riducendo i tempi; esistono altri fattori su cui è possibile intervenire, come la scelta di materiali ingegneristici più performanti. Un esempio potrebbe essere l'impiego di fasce in poliestere (figure 5.23 e 5.24); L'allentamento che subiscono a seguito dell'esposizione agli agenti atmosferici costituisce un elemento di debolezza dell'intervento, ma il suo impiego rapido e in condizione di maggiore sicurezza degli operatori risulta un buon compromesso per gli interventi urgenti nell'immediato post-sisma.



Figura 5.23: Esempio di fasce in poliestere impiegate per la tirantatura (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.24: Cerchiatura della torre campanaria di Alessandria a seguito del terremoto del 2000 (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

Vengono di seguito riportati, a titolo esemplificativo, un paio di interventi significativi estratti dal Manuale Opere provvisionali (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

6.2.4 Estratto della scheda intervento C1 - Chiesa di San Felice Martire



Chiesa di San Felice Martire

Poggio Picenze (AQ)

Supervisione: *Grimaz*

DTS: *Maiolo*

Squadre: *VVF Toscana*

Tra i danni rilevati sulla chiesa di San Felice Martire a causa del terremoto, consideriamo in questo caso le lesioni occorse sulla cella del campanile. Gli interventi sono stati eseguiti dall'esterno della cella campanaria, per mezzo di autoscala e autogru. La sbadacchiatura delle due finestre del campanile ha richiesto un assemblaggio a piè d'opera e ha richiesto diverse modifiche per conformare la struttura all'irregolarità delle aperture (Figura 5.25). Il montaggio è avvenuto dall'esterno per mezzo di una piattaforma di lavoro assicurata all'autogrù (Figura 5.26). Un operatore sull'autoscala monitorava eventuali spostamenti della struttura (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.25: Particolare dell'intervento di sbadacchiatura delle aperture e di cerchiaggio della cella campanaria (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.26: La piattaforma utilizzata per le operazioni di messa in sicurezza (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

6.2.5 Estratto della scheda intervento P2 - Chiesa di San Silvestro



Chiesa di San Silvestro

L'Aquila

DTS: *Ambrosio, Anecchini, Bozzo, Gamberi, Gentile, Giovinazzo, Lucidi, Panella, Marchione, Martoni, Monzoni, Pozzi, Turco.*

ROS: *Agostinone, Aliberti, Bennardo, Bonfiglio, Ceolin, De Marco, Ferreri, Grande, La Macchia, La Veglia, La Mendola, Leone, Loppi, Mallus, Manoni, Miconi, Onnis, Pasqua, Rossi, Zampa.*

Squadre: *VVF Forlì-Cesena, Massa, Pescara, Rieti, Viterbo. SAF Emilia-Romagna, Sardegna, Sicilia.*

Il terremoto del 6 aprile 2009 ha danneggiato pesantemente la struttura ma senza causarne il collasso (Figura 5.27). Le operazioni in quota sono state realizzate mediante autogrù; per limitare l'esposizione degli operatori ad eventuali rischi di crollo, gli elementi (Figura 5.28) sono stati preassemblati a terra e l'autogrù è stata impiegata per il sollevamento e la relativa installazione degli stessi (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.27: Schema fessurativo della facciata e del campanile (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).



Figura 5.28: Sbadacchiatura delle bifore trilobate sovrapposte del campanile (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

7. Caso studio II – L'intervento tecnico urgente: Proposta di un metodo speditivo per il rilievo metrico in contesti emergenziali

“Il sisma che ha colpito le zone del centro Italia a partire dall'agosto del 2016 ha nuovamente evidenziato la fragilità del territorio e del patrimonio culturale che insiste su di esso. Sia nell'area del cratere centrale, sia nelle zone limitrofe, i beni immobili sono stati soggetti a diversi meccanismi e livelli di danno a partire da agosto e durante tutto lo sciame sismico tutt'ora attivo.” (Calantropio, et al., 2017).

Una serie di campagne di acquisizione dati sono state condotte dal Team DIRECT (DISaster RECOVERY Team) del Politecnico di Torino, nell'ambito di un complesso progetto che ha coinvolto l'Ateneo per interventi speditivi d'emergenza finalizzati alla documentazione delle aree colpite. I casi studio presentati in questa tesi sono accomunati dallo stesso contesto di medio rischio, ossia il complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche. Nelle zone più lontane dal cratere centrale il patrimonio costruito è stato infatti soggetto a meccanismi di danneggiamento minori, ma che richiedono in ogni caso azioni di monitoraggio ed intervento.

I processi che impiegano sensori attivi e passivi per il rilevamento 3D, ovvero le tecniche LiDAR da un lato e le nuove frontiere della fotogrammetria digitale dall'altro, convergono sempre più strategicamente, laddove l'obiettivo e il contesto applicativo lo richiedano, verso una rapidità delle tecniche associate a una efficienza e ottimizzazione dei dati in *post-processing*.

“Una delle richieste più pressanti che è stata indirizzata ai ricercatori nel campo della Geomatica a seguito di questi eventi, e più in generale in scenari post emergenza, è stata quella di fornire tecniche speditive per la documentazione dei contesti danneggiati, riducendo al minimo la permanenza degli operatori sul campo e di conseguenza il rischio per gli stessi.” (Calantropio, et al., 2017).

Date queste esigenze, è stato interessante indirizzare la ricerca verso un approccio image-based e sperimentare un metodo di acquisizione speditivo che differisse dai metodi di rilievo fotogrammetrico consolidati. Tale metodo intende non solo fornire un possibile contributo al rilievo delle condizioni geometriche dei manufatti danneggiati, ma anche migliorare le condizioni, in termini di sicurezza e fattibilità operativa, in cui avviene il rilievo metrico (Figura 7.1).

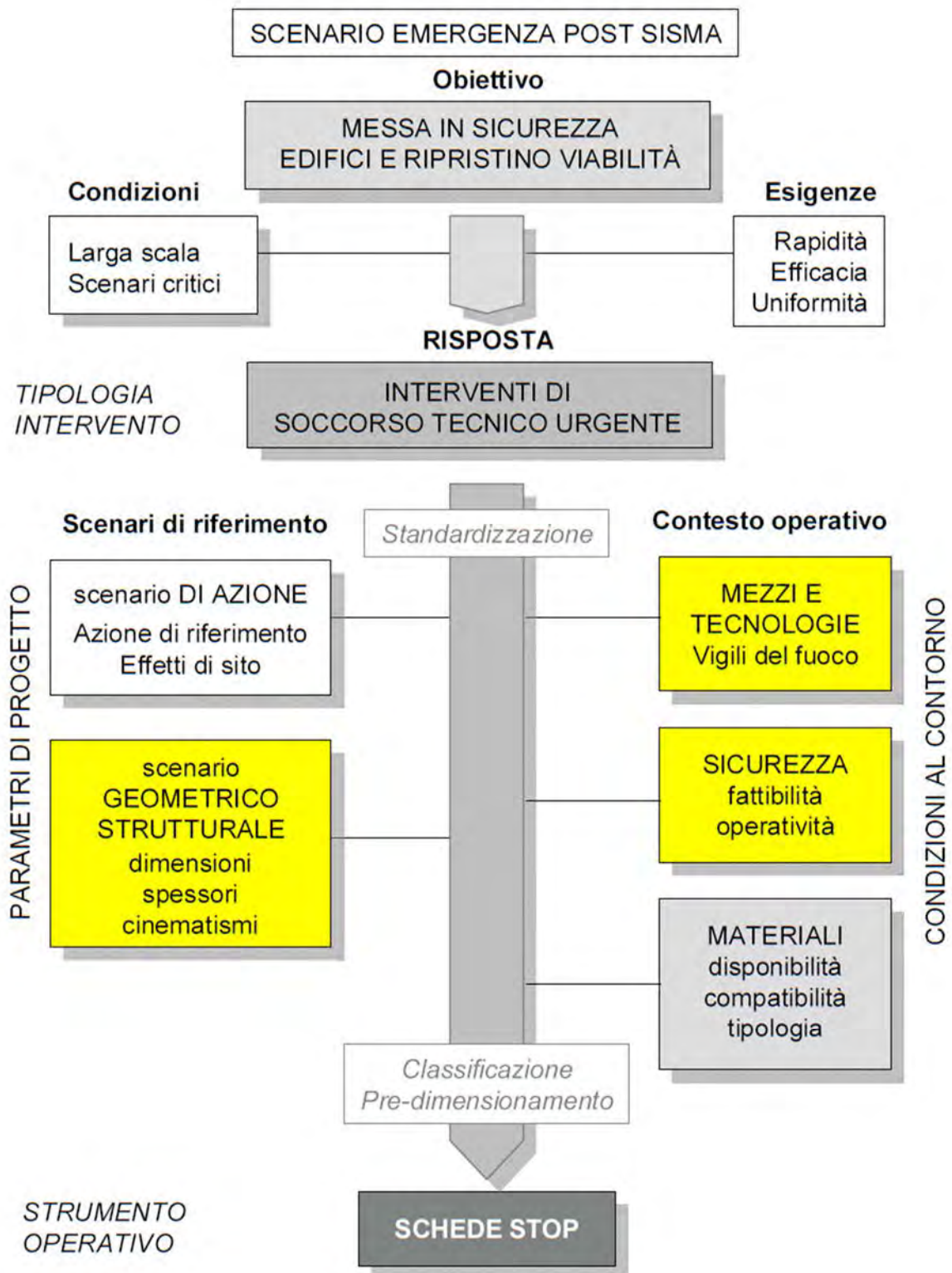


Figura 7.1: Schema logico dei criteri di progetto delle schede STOP, i parametri di progetto e le condizioni al contorno ai quali questo lavoro intende fornire un contributo sono stati evidenziati in giallo (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

7.1 Impiego di sistemi a scansione LiDAR negli interventi tecnici urgenti in emergenza sismica

Oltre alle applicazioni di fotogrammetria, già affrontate precedentemente, è possibile l'impiego di sistemi a scansione LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Un progetto di documentazione tramite scansioni laser terrestri con scanner TLS può acquisire nuvole ad altissima definizione che raggiungono una media di 20-50 mln di punti ciascuna a seconda della precisione e risoluzione preimpostate (diverse centinaia di MB di archiviazione) per una scala di dettaglio di 1:50, la fase successiva di elaborazione, registrazione, ottimizzazione, filtraggio e segmentazione è altresì onerosa in termini di costi tecnologici, tempi operativi e risorse hardware e software.

Per la digitalizzazione di oggetti più ridotti a grandissima scala, i sistemi più avanzati di scansione a luce strutturata classificati per scopi metrologici con precisioni di $\pm 25\div 30\mu\text{m}$ si presentano sul mercato con fasce di prezzo che non rispondono generalmente alle necessità proprie degli scenari operativi degli interventi tecnici in emergenza.

Esiste la possibilità di condurre acquisizioni mediante l'utilizzo di laser scanner portatili; anche in condizioni di luminosità scarsa o addirittura assente, è possibile ottenere dati che permettono di ricavare le misure degli ambienti rilevati.

Ad oggi la tecnologia laser scan è impiegata in questo scenario solamente per rilievi di geometria di elevata complessità, come ad esempio quelli effettuati dal MiBAC (Ministero dei Beni e delle Attività Culturali) nell'intervento richiesto ai VVF per il ripristino della cupola e del tamburo della Chiesa di Santa Maria del Suffragio a L'Aquila a seguito del sisma del 2009 (Figura 7.2).



Figura 7.2: Rilievo laser scan del tiburio e inserimento dei telai metallici per il ripristino della continuità dei setti crollati (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010).

7.2 Impiego di modelli fotogrammetrici digitali negli interventi tecnici urgenti in emergenza sismica

È ormai consolidato all'interno della comunità scientifica che i principi stereoscopici di fotogrammetria, oggi aiutati dagli algoritmi di *image-matching* implementati negli attuali software per il calcolo di modelli fotogrammetrici digitali che utilizzano i principi della *Structure-from-Motion* (SfM), raggiungono elevatissimi livelli di correlazione tra le immagini e l'estrazione di *Tie Points* grazie anche alle soluzioni di auto calibrazione degli algoritmi. I processi di densificazione delle nuvole a partire da blocchi fotogrammetrici georiferiti forniscono sempre più ottimi risultati anche quando il dato di partenza non è un set di immagini acquisite con camera fotogrammetrica reflex calibrata. Proprio per questo motivo è possibile sempre di più sfruttare set di dati provenienti da sensori COTS e *low-cost* quali camere compatte, camere di media risoluzione montate su smartphone e steadycams, costituendo tali strumenti una valida alternativa, più economica e accessibile, rispetto alle fotocamere reflex professionali (Calantropio, et al., 2017).

L'uso dei droni equipaggiati con fotocamera, oltre ai dispositivi GPS, è aumentato sia per le attività di documentazione che per quelle di rilievo metrico. Inoltre questi sistemi si stanno dimostrando affidabili in condizione di emergenza, non solo per l'osservazione a distanza e la pianificazione delle attività di emergenza, ma anche nel caso di generazione di una grande quantità di dati metrici. I modelli 3D e le texture di elevate qualità, estratte in fase di post elaborazione dei dati, possono essere condivise tramite piattaforme open source per garantire una progettazione della risposta di emergenza partecipativa (Chiabrando, et al., 2017).

L'utilizzo di droni permette di ridurre al minimo l'impiego di operatori all'interno degli edifici o su piattaforme di lavoro mobili elevabili (PLE). Alcuni scenari in cui questo può essere considerato un punto di forza sono, ad esempio, gli interventi su torri o campanili simili a quelli analizzati nel capitolo precedente.

Il rilievo a distanza garantisce la massima condizione di sicurezza per gli operatori, a patto che le condizioni al contorno siano tenute sotto osservazione e le operazioni di volo siano condotte in condizioni ottimali (vento inferiore alla leggera brezza, volo diurno, ottemperando alle direttive ENAC aggiornate alla data dell'operazione). Va ricordato che la tecnologia drone è stata sviluppata appositamente per demandare alle macchine compiti in situazioni in cui l'intervento umano risulterebbe rischioso, difficoltoso e oneroso.

7.3 Confronto tra modelli generati mediante metodi di georiferimento per “Control Points” e per “Scale Bars”

Nell’ottica di proporre un metodo di acquisizione rapido, economico, di facile applicazione, che riducesse al minimo la permanenza degli operatori sul campo, senza compromettere per questo la qualità dei dati acquisiti, si è deciso di sperimentare un metodo di georiferimento mediante “scale bars” di modelli fotogrammetrici digitali, generati tramite dati raccolti utilizzando sensori low-cost.

Il caso studio selezionato per condurre alcuni test preliminari, volti a valutare l’attendibilità di questo metodo, è l’elemento architettonico costituito dal portale *romanico-gotico* (Figura 7.3) situato nel chiostro del complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (XIII-XV sec.).



Figura 7.3: Porzione di ortomosaico del portale utilizzato per condurre i test valutativi di attendibilità del metodo proposto.

Per la generazione di un modello fotogrammetrico affidabile, che servisse da “*ground truth*” per la valutazione del metodo proposto, sono stati preliminarmente acquisiti dei punti di controllo tramite stazione totale, fondamentali per il corretto georiferimento del modello stesso (Figura 7.4 e Tabella 7.1).

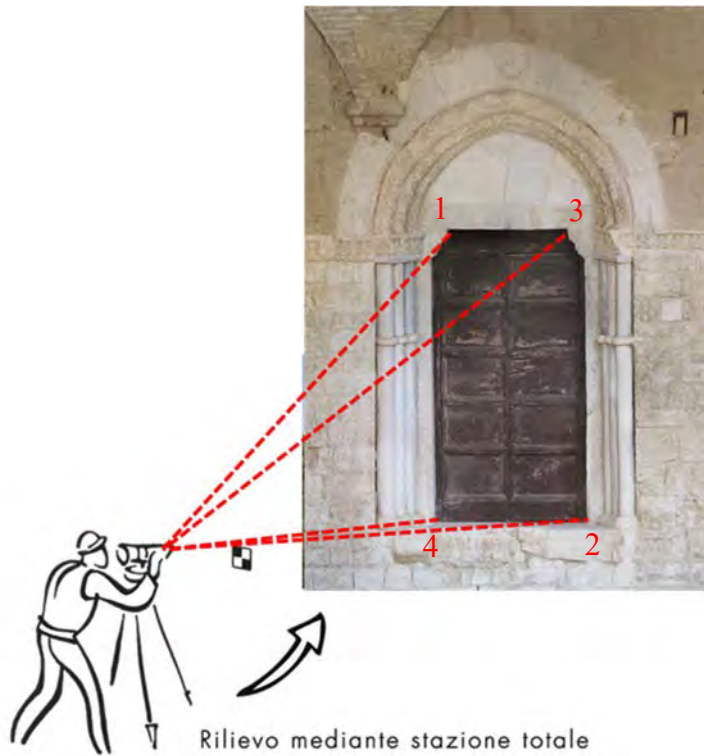


Figura 7.4: Il disegno illustra la fase di acquisizione di alcuni punti sull’oggetto architettonico per mezzo della stazione totale.

Tabella 7.1: Coordinate* dei punti acquisiti tramite stazione totale.

ID Punto	Posizione	Coordinata X (m)	Coordinata Y (m)	Coordinata Z (m)
1	Alto a sinistra	1.779	-1.930	320.777
2	Basso a destra	0.854	-2.624	318.877
3	Alto a destra	0.893	-2.632	320.796
4	Basso a sinistra	1.799	-2.003	318.867

*Coordinate nel sistema di riferimento locale relativo alla rete topografica di inquadramento, realizzata per le operazioni di rilievo metrico del complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC).

Per valutare la possibilità di scalare un modello fotogrammetrico mediante misure dirette (*Scale Bars*), si è deciso di procedere con una simulazione volta a valutare la correttezza e la validità della procedura ipotizzata, acquisendo mediante rotella metrica le misure di larghezza e di altezza del portale. Per controllare l'accuratezza del modello generato sono state misurate anche le dimensioni delle due diagonali, utilizzate poi solamente come *Check Scale Bars*, non includendo cioè le stesse nella procedura di geo riferimento del modello (Figura 7.5 e Tabella 7.2).

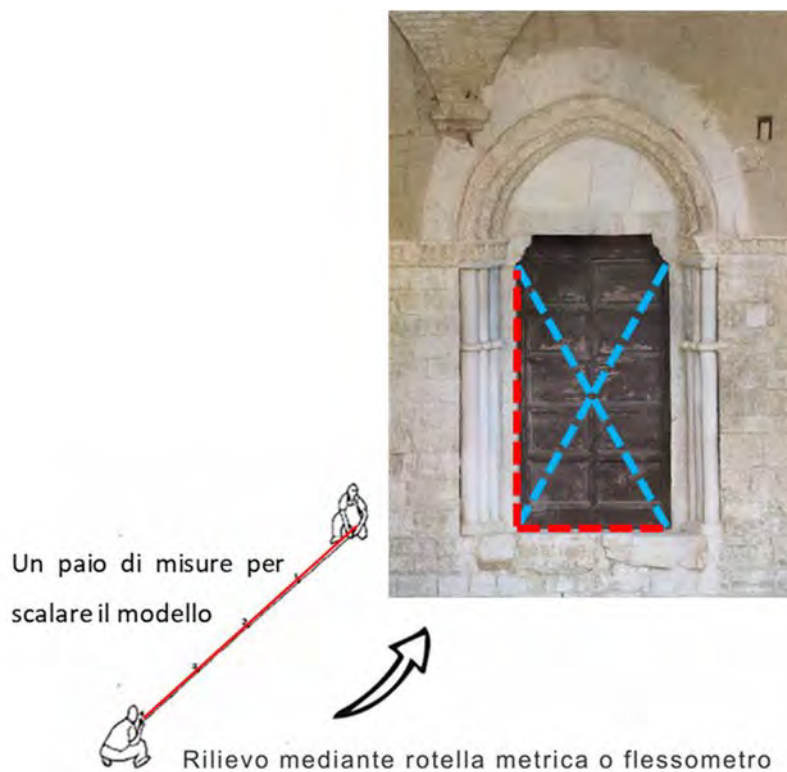


Figura 7.5: Il disegno illustra la fase di acquisizione di alcune misure sull'oggetto architettonico per mezzo di rotella metrica o flessometro. In rosso sono indicate le control scale bars, in blu le check scale bars.

Tabella 7.2: Misure acquisite mediante rotella metrica.

ID Scale bar	Distanza (m)
Altezza	1.911
Larghezza	2.224
Diagonale 1-2*	2.221
Diagonale 3-4*	1.131

*Check scale bars non utilizzate per il georiferimento.

Per la raccolta dei dati (fotogrammi) si è deciso di utilizzare tre sensori low-cost; in questo caso sono stati impiegati una fotocamera compatta, uno smartphone dotato di fotocamera, e una steadycam (Tabella 7.3).

Per le operazioni di generazione delle nuvole di punti, densificazione e generazione di mesh texturizzate per tutti i dataset esaminati in questo paragrafo è stato utilizzato il software Agisoft PhotoScan. Si tratta di un software professionale per fotogrammetria, disponibile nella versione Standard e Pro; la versione standard è sufficiente per le operazioni che sono state eseguite in questo caso di studio, mentre la versione Pro è orientata alla realizzazione di contenuti GIS.

Per ognuno degli strumenti utilizzati è stato quindi creato un dataset contenente le sole immagini acquisite mediante quello strumento, per un totale di 3 dataset.

Successivamente, seguendo il workflow operativo del software, si è proceduto alla generazione della nuvola di punti. Il funzionamento consiste nel trovare automaticamente migliaia di punti comuni tra le immagini; ogni punto viene chiamato Keypoint, per questo motivo è importante che le immagini si sovrappongano parzialmente. Quando 2 keypoints sono trovati in due diverse immagini, diventano matched keypoints. Ogni gruppo di matched keypoints genererà un punto 3D; più keypoints vengono generati, maggiore sarà l'accuratezza del modello 3D.

Da questo punto in poi si è quindi proceduto separatamente, copiando ciascuno dei tre dataset su due file di progetto diversi; in un caso sono stati importati i punti di controllo misurati con stazione totale, nell'altro caso le sole distanze misurate con la rotella metrica.

Si è provveduto quindi alla densificazione delle nuvole di punti e alla generazione di mesh texturizzate per tutti e sei i file di progetto (due metodi per ognuno dei tre dataset relativi agli strumenti impiegati).

Le tabelle 7.4, 7.5 e 7.6 illustrano i dettagli dei tre dataset, sia per il metodo che impiega punti di controllo che per quello che impiega le scale bars.

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati parametri comuni a tutti i dataset; questo accorgimento è necessario affinché le successive operazioni di confronto dei modelli generati siano quanto più indipendenti da eventuali discrepanze nei settaggi del programma, e dipendano solo dal metodo di geo riferimento, dall'assegnazione della scala e dal sensore utilizzato (Tabella 7.7).

Tabella 7.3: Specifiche tecniche degli strumenti utilizzati per la raccolta dei dati.



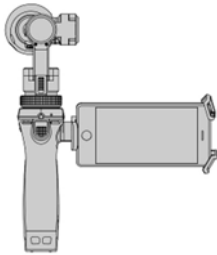
	Fotocamera	Smartphone	Steadycam
			
Produttore	Canon	Huawei	DJI
Modello	PowerShot A1100 IS	P9	Osmo+
Prezzo	220 €	350 €	550 €
Sensore	12.1 Megapixel, 1/2.3"	Dual Sony IMX 286 12 Megapixel	1/2.3" CMOS 12.4 Megapixel
Lente	6.2-24.8mm f/2.7-5.6 (35mm film equivalent: 35-140mm)	27mm equivalent focal length F2.2 aperture	94° FOV 20mm f/2.8 (35mm format equivalent)
Messa a fuoco	1.6 ft./50cm-infinity	da f/0.9 a f/16	3.5m (suitable range 1.5m to ∞)
ISO	80-1600	50-3200	100-3200 (video); 100-1600 (photo)
Velocità otturatore	15s – 1/1600s	30s – 1/4000s	8s - 1/8000s
Dimensione immagine	4000 x 3000 pixels	4000 x 3000 pixels	4000 x 3000 pixels
Risoluzione video	640 x 480 (30 fps), 320 x 240 (30 fps)	1080p (60 fps)	C4K 4096 x 2160 (24/25 fps) FHD: 1920 x 1080 (da 24 a 100 fps)
Formato foto	Exif 2.2 (JPEG)	PNG, GIF, JPEG, BMP, WEBP, WBMP	JPEG, DNG(RAW)
Formato video	AVI	3GP, MP4, WMV, RM, RMVB, ASF	MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Schede SD	SD; Capacità massima 128 GB	Micro SD; Capacità massima 256 GB	Micro SD; Capacità massima 64 GB

Tabella 7.4: Specifiche dei datasets della fotocamera compatta elaborati tramite il software AGSOFT PhotoScan.


Dataset		Control Points	Scale Bars
Dati del rilievo	Immagini calibrate/ immagini totali	49/49	49/49
	Tie points	34,154	37,515
	Proiezioni	172,150	203,976
	Errore di riproiezione	1.37 pix	1.12 pix
	Ground resolution	0.832 mm/pix	1.21 mm/pix
	Area di copertura	3.23 m ²	3.08 m ²
	Risoluzione	4000 x 3000	4000 x 3000
Control Points	Numero	4	
	Errore X (mm)	1.13167	
	Errore Y (mm)	2.86186	
	Errore Z (mm)	0.861114	
	Errore XY (mm)	3.07749	
	Total (mm)	3.19569	
	Image (pix)	0.831	
Control Scale Bars	Altezza – distanza (m)		1.91123
	Altezza – errore (m)		0.000232115
	Larghezza – distanza (m)		1.13061
	Larghezza – errore (m)		0.000392637
	Totale errore (m)		0.000322522
Nuvola di punti	Punti	34,154 of 42,730	37,515 of 42,494
	Errore quadratico medio	0.312904 (1.3675 pix)	0.254749 (1.1249 pix)
	Errore Massimo	1.2572 (27.0213 pix)	1.05649 (25.5984 pix)
	Dimensione media key point	4.28587 pix	4.27913 pix
	Sovrapposizione effettiva	5.75668	5.80823
	Punti (Nuvola densa)	10,727,517	10,509,213
Modello	Facce	2,145,491	2,101,832
	Vertici	1,075,683	1,053,324
	Texture	16,384 x 16,384	16,384 x 16,384

Tabella 7.5: Specifiche dei datasets dello smartphone elaborati tramite il software AGSOFT PhotoScan.


Dataset		Control Points	Scale Bars
Dati del rilievo	Immagini calibrate/ immagini totali	24/24	24/24
	Tie points	30,120	30,298
	Proiezioni	103,941	104,469
	Errore di riproiezione	1.75 pix	1.57 pix
	Ground resolution	0.77 mm/pix	0.851 mm/pix
	Area di copertura	4.3 m ²	4.3 m ²
	Risoluzione	2976 x 3968	2976 x 3968
Control Points	Numero	4	
	Errore X (mm)	3.07752	
	Errore Y (mm)	3.06079	
	Errore Z (mm)	2.00594	
	Errore XY (mm)	4.34046	
	Total (mm)	4.78157	
	Image (pix)	1.062	
Control Scale Bars	Altezza – distanza (m)		1.91156
	Altezza – errore (m)		0.000558582
	Larghezza – distanza (m)		1.13005
	Larghezza – errore (m)		-0.00094869
	Totale errore (m)		0.000778468
Nuvola di punti	Punti	30,120 of 31,450	30,298 of 31,504
	Errore quadratico medio	0.467336 (1.74775 pix)	0.426313 (1.57024 pix)
	Errore Massimo	1.62204 (23.3848 pix)	1.74882 (23.6669 pix)
	Dimensione media key point	3.95429 pix	3.95355 pix
	Sovrapposizione effettiva	3.50827	3.51047
	Punti (Nuvola densa)	12,916,876	13,041,009
Modello	Facce	2,583,365	2,608,190
	Vertici	1,294,218	1,306,497
	Texture	16,384 x 16,384	16,384 x 16,384

Tabella 7.6: Specifiche dei datasets della steadycamera elaborati tramite il software AGSOFT PhotoScan.

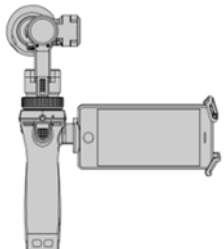
Dataset		Control Points	Scale Bars
Dati del rilievo	Immagini calibrate/ immagini totali	43/43	43/43
	Tie points	67,522	30,409
	Proiezioni	265,913	154,249
	Errore di riproiezione	0.884 pix	0.902 pix
	Ground resolution	2.19 mm/pix	2.41 mm/pix
	Area di copertura	12.2 m ²	36.5 m ²
	Risoluzione	1920 x 1080	1920 x 1080
Control Points	Numero	4	
	Errore X (mm)	3.48969	
	Errore Y (mm)	2.91795	
	Errore Z (mm)	3.36107	
	Errore XY (mm)	4.54888	
	Total (mm)	5.6559	
	Image (pix)	0.864	
Control Scale Bars	Altezza – distanza (m)		1.90811
	Altezza – errore (m)		-0.00289119
	Larghezza – distanza (m)		1.1363
	Larghezza – errore (m)		0.00529517
	Totale errore (m)		0.00426601
Nuvola di punti	Punti	67,522 of 73,466	30,409 of 33,624
	Errore quadratico medio	0.256266 (0.884177 pix)	0.257615 (0.901675 pix)
	Errore Massimo	0.922519 (18.6519 pix)	0.94877 (19.0427 pix)
	Dimensione media key point	3.38435 pix	3.40854 pix
	Sovrapposizione effettiva	4.30743	5.46485
	Punti (Nuvola densa)	2,211,063	2,588,001
Modello	Facce	442,202	517,593
	Vertici	222,344	260,408
	Texture	16,384 x 16,384	16,384 x 16,384

Tabella 7.7: Per tutti i dataset sono stati utilizzati gli stessi parametri di PhotoScan, come indicato nella seguente tabella.

Parametri di allineamento		Parametri di ricostruzione modello	
Accuratezza	Alta	Qualità	Alta
Preselezione coppie	Generica	Filtro profondità	Moderato
Limite key point	40.000		
Limite tie point	4.000	Parametri di texturizzazione	
		Modalità mapping	Generica
		Modalità blending	Mosaico
		Dimensione texture	16.384 x 16384 px
Parametri di ricostruzione nuvola			
Qualità	Alta		
Filtro profondità	Moderato		

Ai fini di questa tesi, per considerare un'eventuale applicazione del metodo proposto per le fasi emergenziali, vengono di seguito riportati alcuni dati sui tempi di acquisizione e di elaborazione relativi ai test svolti (Tabella 7.8).

Tabella 7.8: Tempi di acquisizione e di elaborazione dei vari dataset relativi ai test condotti sul portale del chiostro del complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC).

Dataset	Fotocamera compatta		Smartphone		Steadycam	
	Control points	Scale Bars	Control points	Scale Bars	Control points	Scale Bars
Numero fotogrammi	49		24		43	
Tempi di acquisizione	12 min		2 min		< 1 min	
Tempi di elaborazione*	77 min		51 min		25 min	

*Dipende dall'hardware della macchina utilizzata e da eventuali processi contemporanei all'elaborazione; in questo caso è stato utilizzato un PC con Windows 10 PRO 64 bit, Processore Intel Core i7-2600 @ 3.40 GHz (8 CPUs), 24 GB di Ram e due Schede grafiche NVIDIA GeForce GTS 450.

Sono stati successivamente analizzati gli errori medi relativi a ciascuno dei test svolti (Tabella 7.9); per errore medio si intende la differenza media, in metri, tra le posizioni dei punti (o le distanze misurate) e importate dall'utente, e quelle stimate dal software nel primo allineamento.

Tabella 7.9: Errori medi dei vari dataset relativi ai test condotti sul portale del chiostro del complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC).

	Fotocamera compatta		Smartphone		Steadycam	
	<i>m</i>	<i>px</i>	<i>m</i>	<i>px</i>	<i>m</i>	<i>px</i>
Control Points	0,003196	0,831	0,004782	1,062	0,005656	0,864
Control Scale Bars	0,001158	-	0,003821	-	0,008416	-

Gli errori in questione si collocano tutti ampiamente sotto il centimetro (ordine di grandezza millimetrico) pertanto i risultati ottenuti sono da considerarsi molto adeguati per gli scopi proposti.

Con l’obiettivo di stimare la qualità complessiva del modello, o sue porzioni locali, rispetto alla sola valutazione della qualità sui punti di controllo, le nuvole di punti sono state confrontate mediante il software commerciale 3DReshaper, prodotto dall’azienda Technodigit-Hexagon.

Le nuvole di punti sono state inizialmente allineate mediante il comando “best-fit”; questo comando analizza i modelli trovando la soluzione che minimizzi gli errori di allineamento relativo. Un allineamento delle coppie di modelli generati da ogni sensore è condizione necessaria per poter analizzare gli scostamenti, intesi come la distanza media tra i punti dei modelli esaminati.

A seguito dei best fit eseguiti sulle tre coppie, la tabella 7.10 riporta sinteticamente gli errori medi e la deviazione standard di ogni trasformazione. È importante precisare che il comando non altera la scala dei modelli, ma esegue solamente operazioni di rototraslazione.

Tabella 7.10: Errori medi e deviazioni standard relativi ai best-fit delle tre coppie di nuvole di punti

	Fotocamera compatta	Smartphone	Steadycam
Errori medi (m)	0,00554	0,00696	0,00956
Deviazione standard (m)	0,00796	0,01003	0,01403

Le Tavole 1, 2 e 3 illustrano i confronti eseguiti sulle coppie di modelli generati per control points e per scalebars per ogni dataset relativo allo strumento utilizzato per la raccolta dati.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

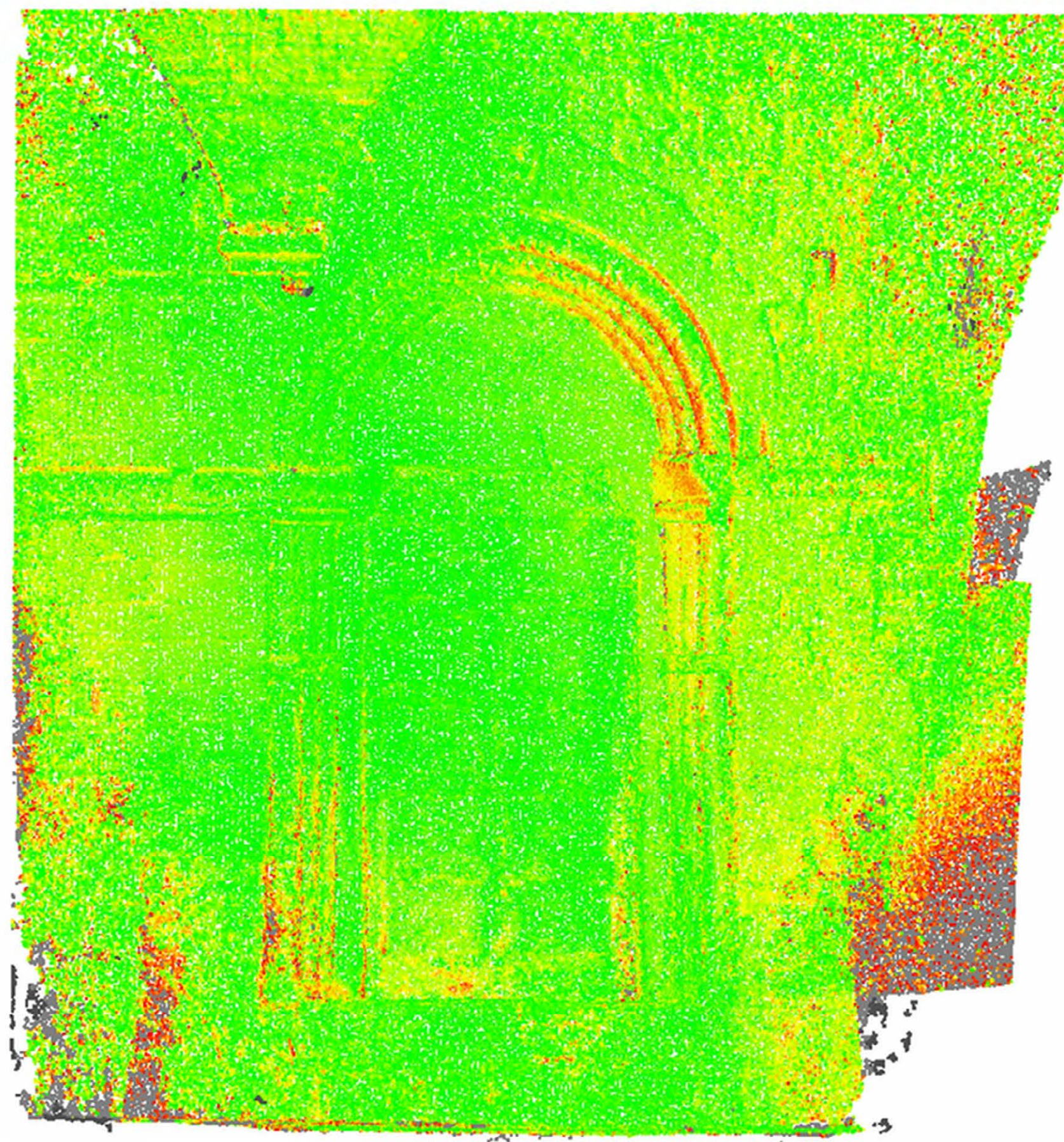
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 1

Confronto tra le nuvole di punti generate tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera Canon)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



SCALA 1:20





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

**Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città**

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

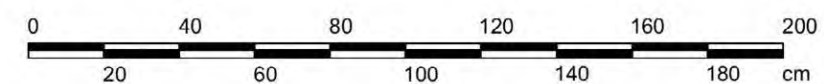
TAVOLA 2

Confronto tra le nuvole di punti generate tramite control points e tramite scale bars (Smartphone Huawei P9)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



SCALA 1:20





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

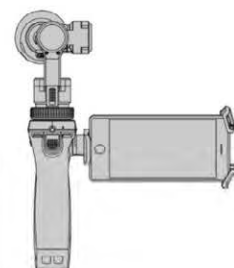
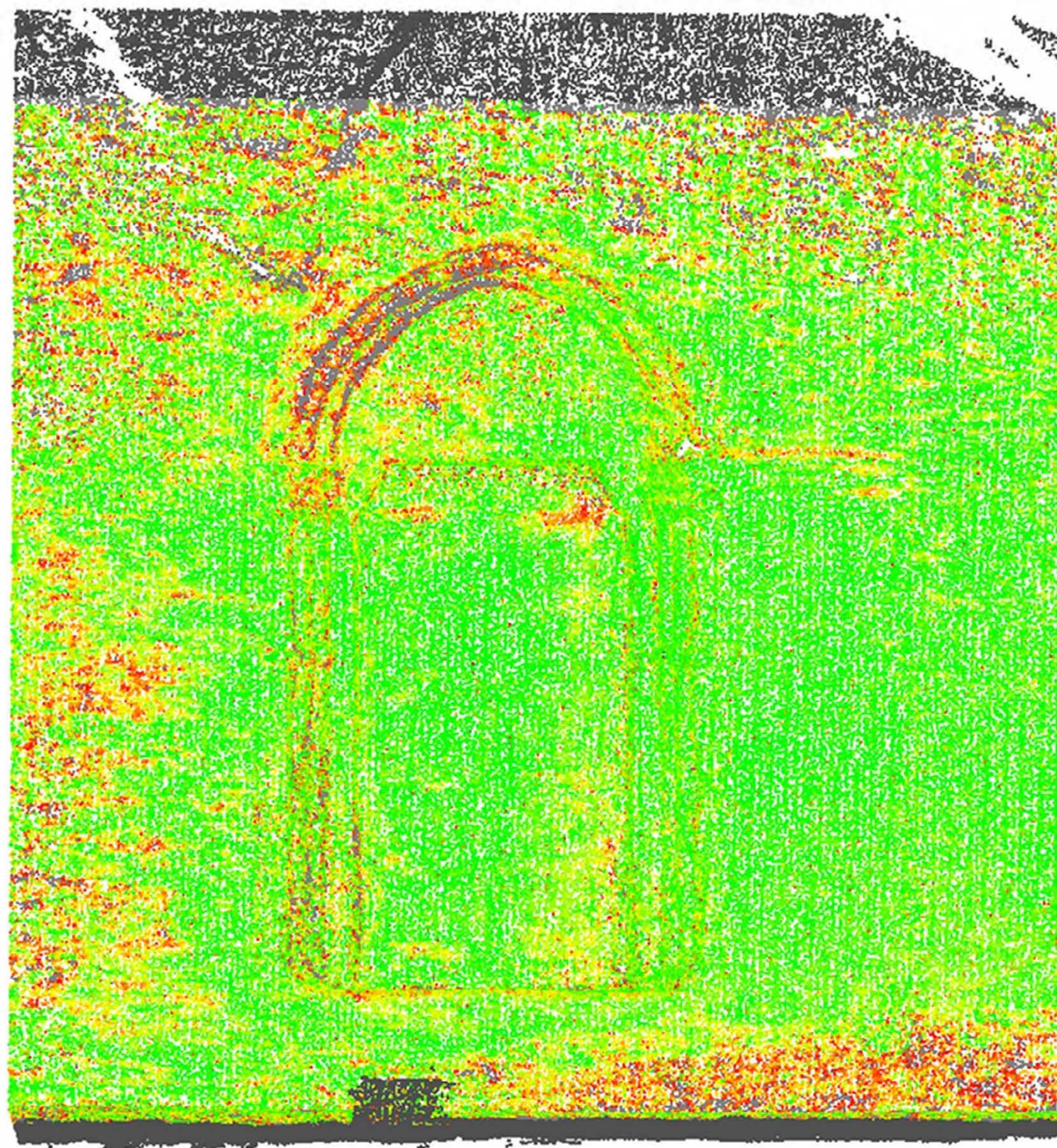
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

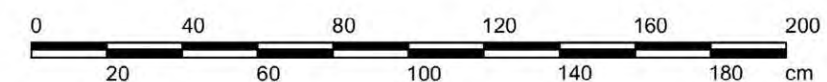
TAVOLA 3

Confronto tra le nuvole di
punti generate tramite control
points e tramite scale bars
(Steadycam DJI OSMO+)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



SCALA 1:20



La barra a destra permette di associare ad ogni colore un valore, misurato in metri, relativo allo scostamento tra i due modelli confrontati. La percentuale indica la quantità di punti del modello che si trovano ad una determinata distanza relativa. In altri termini si potrebbe affermare che le aree tendenti al verde sono quelle che risultano geometricamente coerenti in entrambi i modelli.

Il valore di un centimetro è stato posto come valore massimo della scala, considerando che per la realizzazione di opere provvisionali in legno, un errore superiore sarebbe da considerare inaccettabile.

I punti del grafico colorati in grigio rappresentano coppie di punti relativi ai due modelli aventi una distanza superiore al centimetro, e pertanto esclusi dal confronto.

Con l'obiettivo di ricavare misure che possano essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto volto alla realizzazione di un'opera provvisoria, risulta altresì interessante il confronto di un paio di sezioni verticali, generate ad un intervallo di 20 cm mediante piani paralleli al piano idealmente definito dalla superficie della porta in legno.

Le sezioni sono state generate per mezzo dell'apposito comando "create along axis" utilizzando come asse la normale passante per il piano idealmente definito dalla porta.

Le sezioni sono generate contemporaneamente in entrambi i modelli, permettendo in seconda istanza di effettuare un confronto puntuale dello scostamento. Anche in questo caso la barra a destra permette di associare ad ogni colore un valore, espresso in metri, indice della distanza del relativo punto tra i due modelli.

I valori massimi di scostamento analizzati sono stati fissati, in questo caso, ai valori di +0,015 m e -0,015 m per consentire un'analisi più accurata. Gli stessi valori massimi risultano evidenziati con dei riquadri in ognuna delle sezioni generate.

Le tavole 4, 5 e 6 illustrano i confronti eseguiti sulle sezioni estratte dalle coppie di modelli generati per control points e per scalebars per ogni dataset relativo allo strumento utilizzato per la raccolta dati.

Si può osservare come gli scostamenti siano in media ampiamente sotto il mezzo centimetro. Possiamo pertanto affermare che il metodo descritto risulta qualitativamente e quantitativamente soddisfacente per il rilievo delle caratteristiche geometriche di elementi architettonici da rilevare nell'immediato post-sisma, in funzione della realizzazione di elementi costituenti opere provvisorie, come ad esempio una sbadacchiatura del portale in questione.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrandò

Candidato

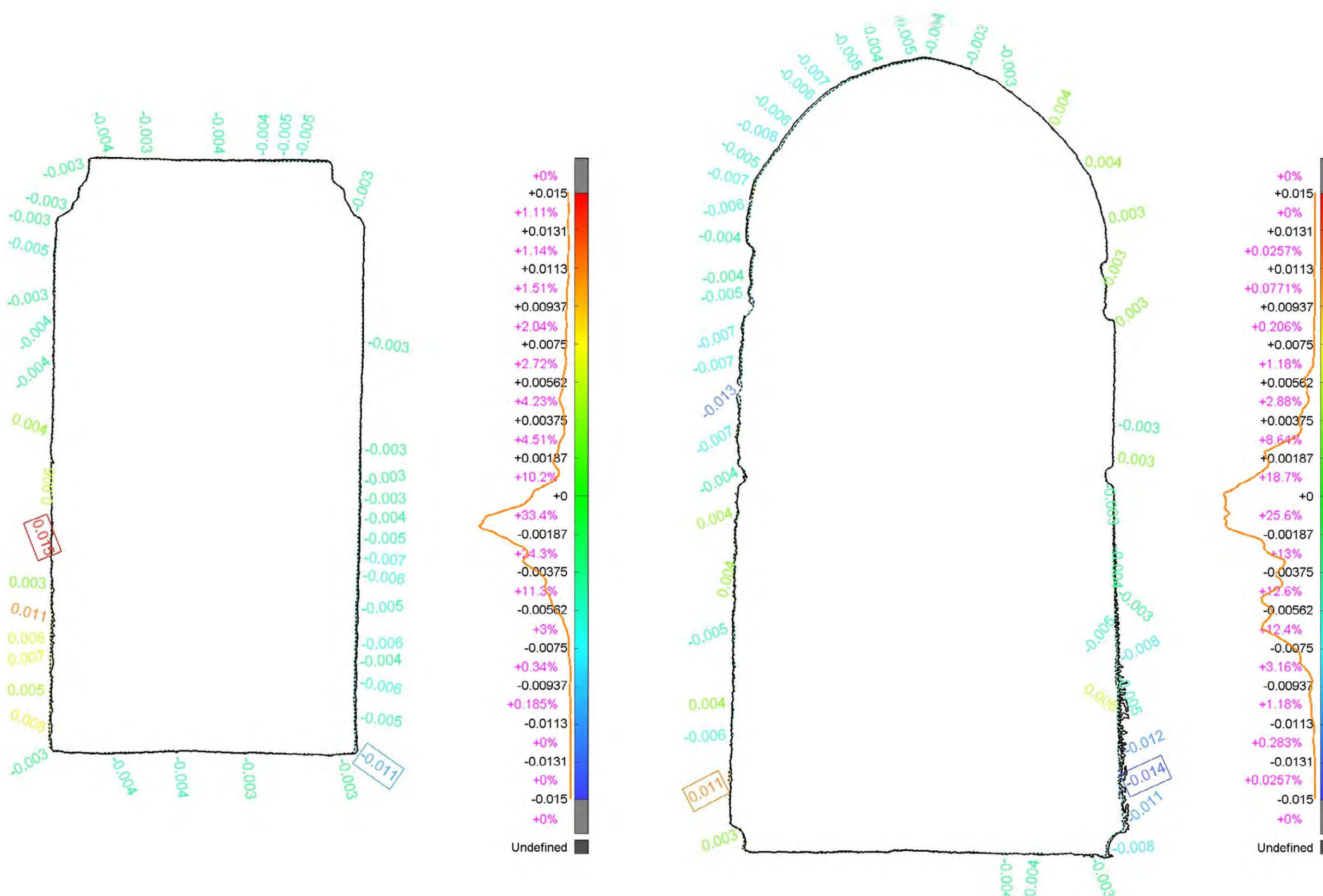
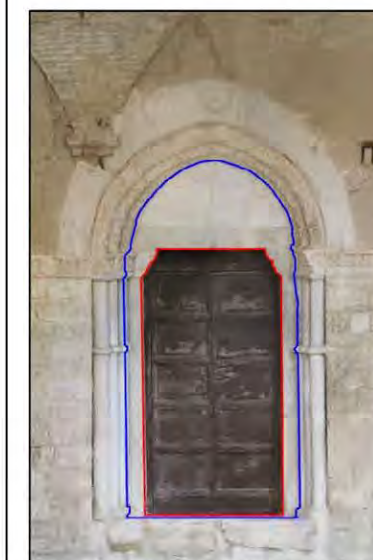
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 4

Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera Canon)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche

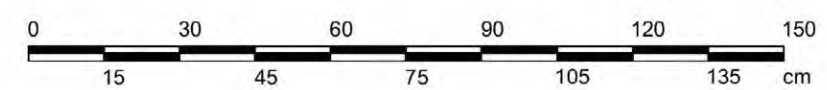


- +0%
- +0.015
- +1.11%
- +0.0131
- +1.14%
- +0.0113
- +1.51%
- +0.00937
- +2.04%
- +0.0075
- +2.72%
- +0.00562
- +4.23%
- +0.00375
- +4.51%
- +0.00187
- +10.2%
- +0
- +33.4%
- 0.00187
- +4.3%
- 0.00375
- +11.3%
- 0.00562
- +3%
- 0.0075
- +0.34%
- 0.00937
- +0.185%
- 0.0113
- +0%
- 0.0131
- +0%
- 0.015
- +0%



— Sezione di modello generato tramite scale bars
 - - - - Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)

SCALA 1:15





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

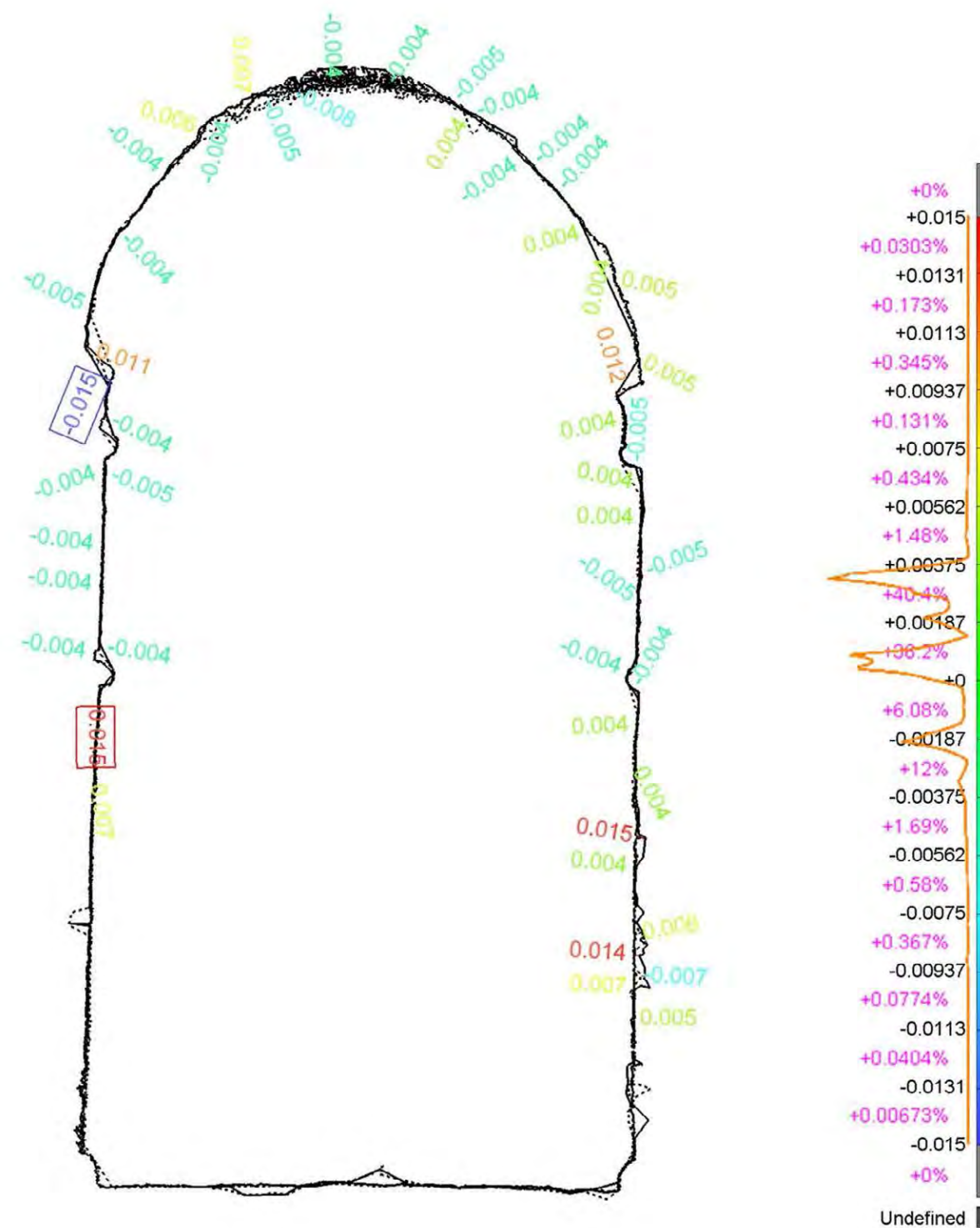
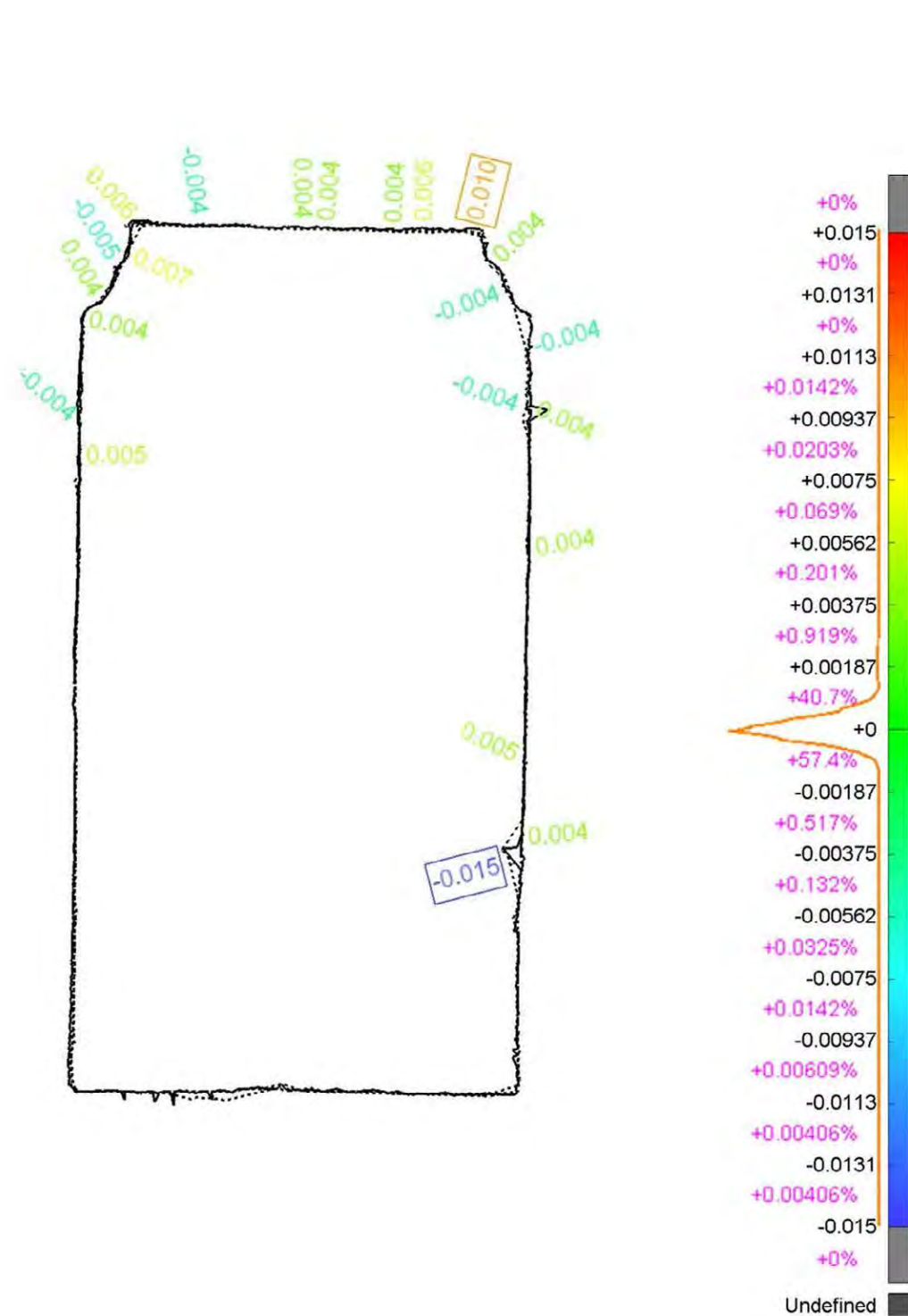
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 5

Confronto tra sezioni di modelli
generati tramite control points
e tramite scale bars
(Smartphone Huawei P9)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



— Sezione di modello generato tramite scale bars
- - - Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)

SCALA 1:15



0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 cm



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

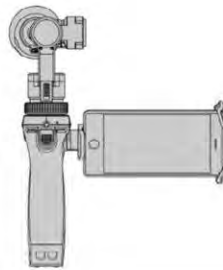
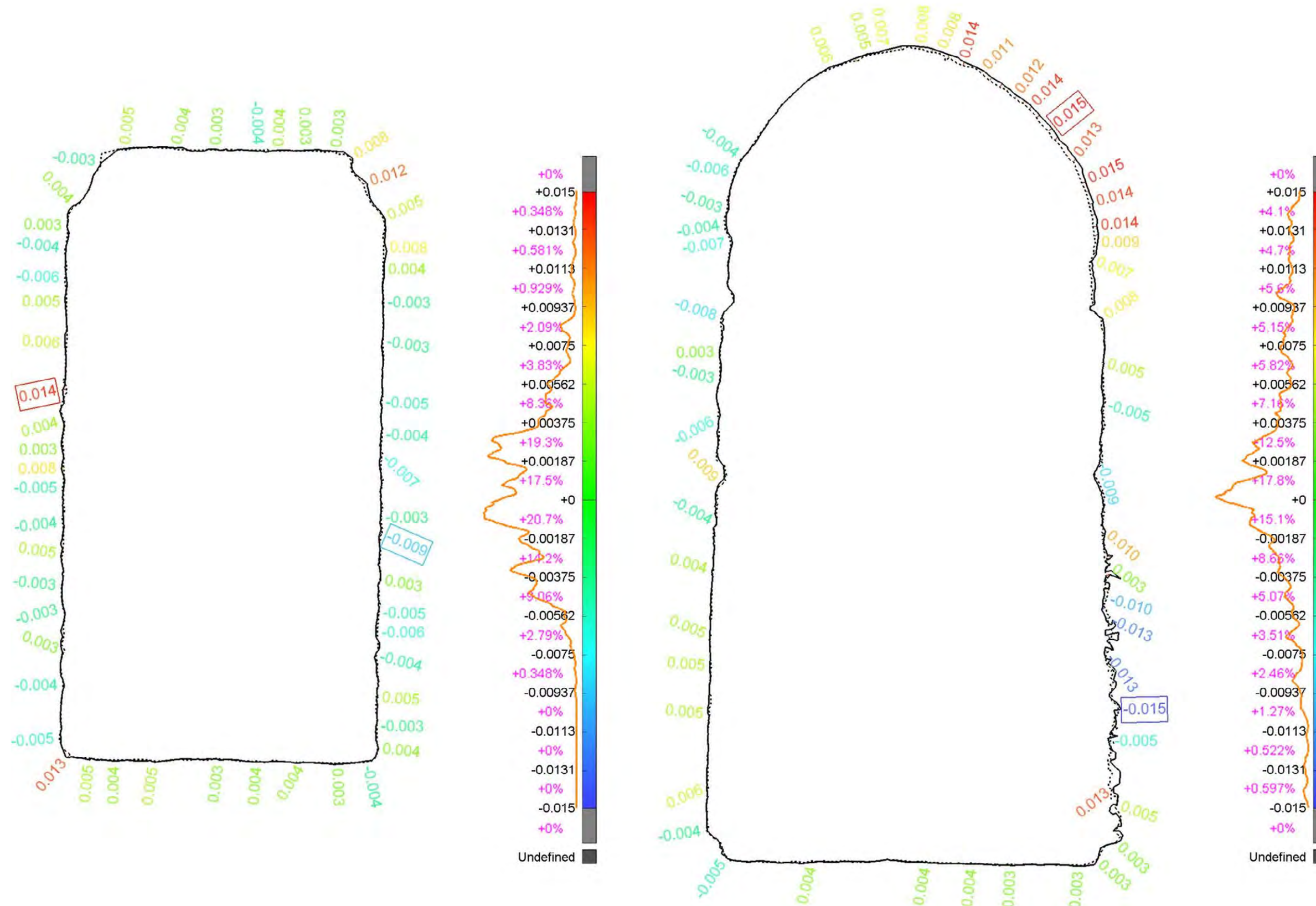
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 6

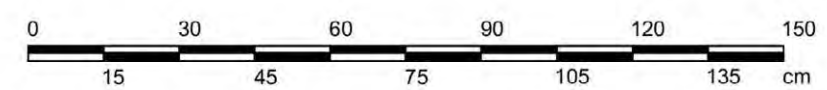
Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Steadycam DJI OSMO+)

Portale del chiostro
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



— Sezione di modello generato tramite scale bars
 - - - - - Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)

SCALA 1:15



7.4 Sperimentazione del metodo proposto sulla torre campanaria e sul portale principale del Duomo Vecchio di San Severino Marche

Dopo aver dimostrato l'affidabilità del metodo finora analizzato, si è deciso di procedere con un'applicazione sperimentale connessa ad un esempio concreto, in cui l'inaccessibilità del manufatto architettonico da rilevare giustifica l'utilizzo di questa procedura. In questo caso si intende simulare le operazioni di rilievo metrico finalizzate alla progettazione di un'opera provvisoria funzionale alla bifora danneggiata (lato ovest) della torre campanaria (Figura 7.6).



Figura 7.6: Foto da drone della bifora dissestata (ovest) del campanile del Duomo Vecchio di San Severino Marche.

Nell'ottica di predisporre di un dataset che permettesse di compiere delle analisi sulla totalità della facciata principale e della torre campanaria, le operazioni di acquisizione non si sono limitate alla porzione della bifora dissestata, ma sono state estese all'intero complesso.

Questo ha permesso di valutare l'attendibilità delle misure complessive, ipotizzando che in un intervento del genere non si agisca soltanto puntualmente, ma sulla totalità della fabbrica.

Per la generazione di un modello fotogrammetrico affidabile, che servisse da "ground truth" per il confronto con il metodo proposto, sono stati preliminarmente acquisiti 59 punti di controllo tramite stazione totale, fondamentali per il corretto georiferimento del modello stesso (Figura 7.7).

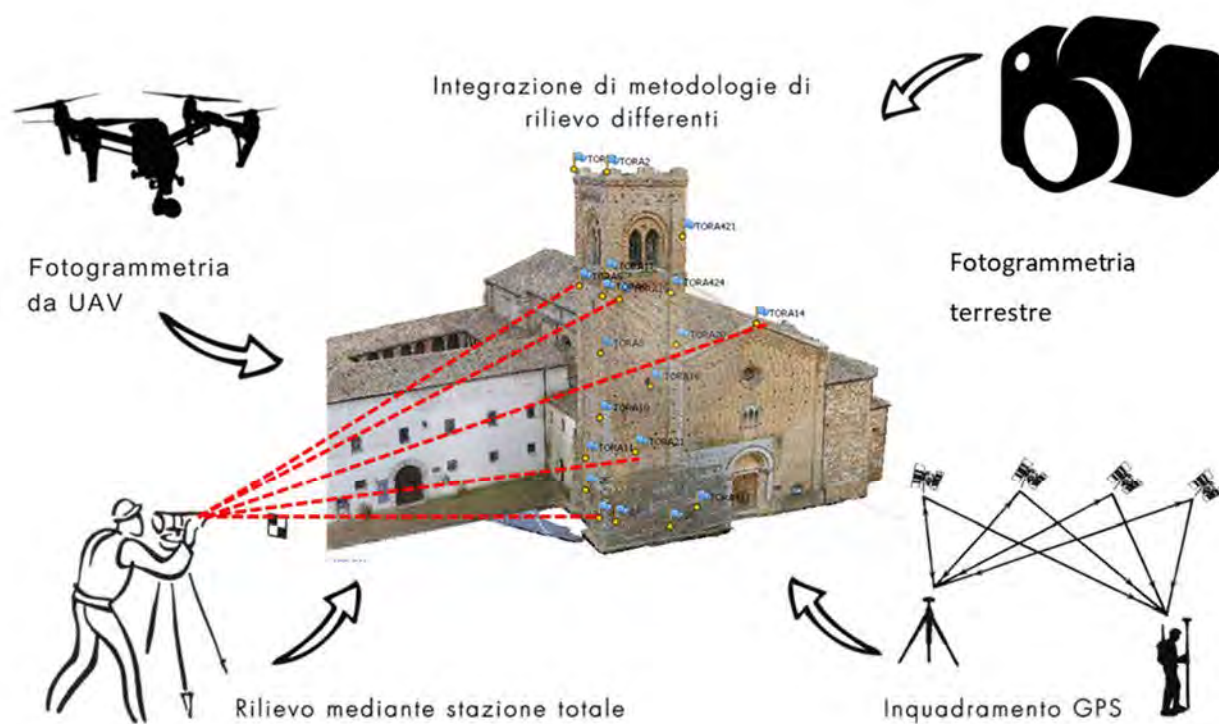


Figura 7.7: Il disegno illustra la fase di acquisizione di alcuni punti sull'oggetto architettonico per mezzo della stazione totale. L'integrazione multisensore è volta alla generazione del modello di ground truth.

Per la generazione del modello fotogrammetrico speditivo si è provveduto all'acquisizione, mediante rotella metrica, di un paio di misure alla base della torre campanaria. E' stata misurata anche una terza distanza da utilizzare come "Check Scale Bars", non includendo cioè la stessa nella procedura di geo riferimento del modello (Figura 7.8 e Tabella 7.11).

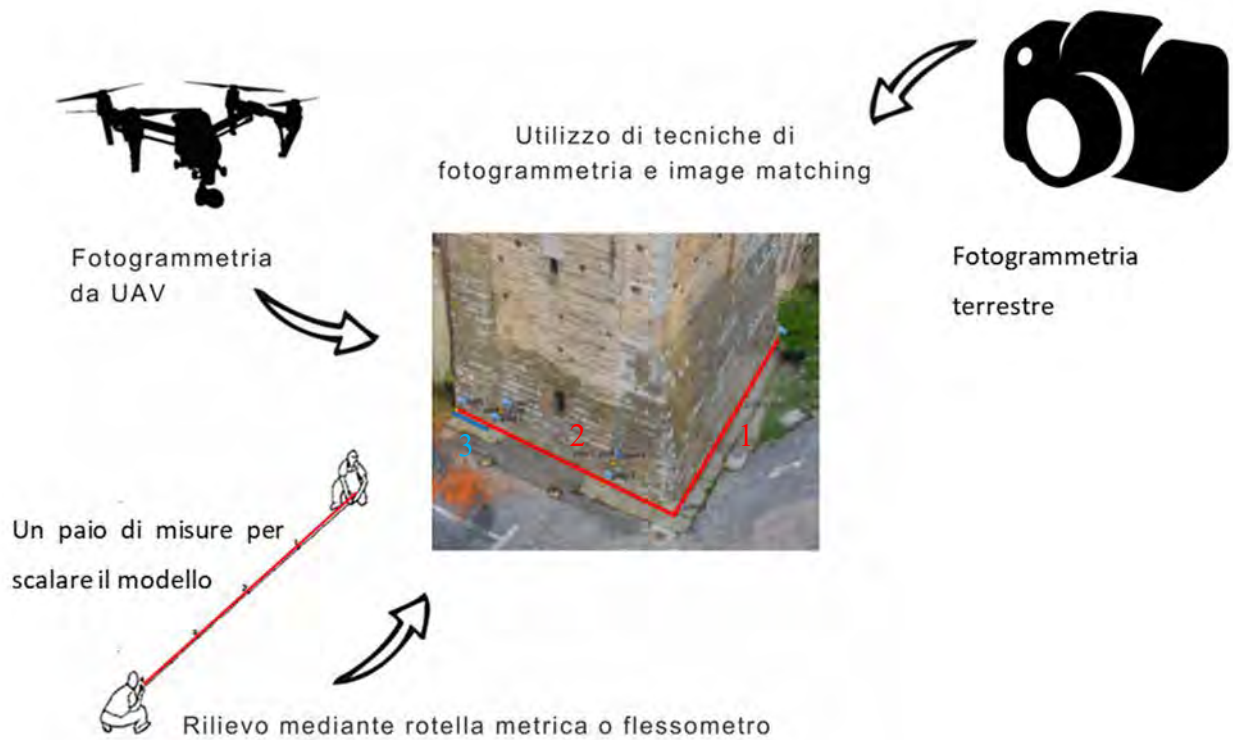


Figura 7.8: Il disegno illustra la fase di acquisizione di alcune misure alla base della torre campanaria per mezzo di rotella metrica. In rosso sono indicate le control scale bars (1 e 2), in blu la check scale bar (3).

Tabella 7.11: Misure acquisite mediante rotella metrica

ID Scale bar	Distanza (m)
Lunghezza 1	10.671
Lunghezza 2	7.566
Lunghezza 3*	1.231

*Check scale bar non utilizzata per il geo riferimento

Sono stati utilizzati dei dataset contenenti immagini aeree ottenute da drone DJI Phantom 4, equipaggiato con fotocamera 4K (Figure 7.9 e 7.10). Inoltre il dataset è stato integrato con alcune immagini scattate a terra con macchina fotografica Nikon D800E con obiettivo da 35 mm (Tabella 7.12).

Il dataset utilizzato nel primo caso (ground truth) conteneva la totalità dei fotogrammi; nel secondo caso è avvenuta un'opportuna selezione dei dati acquisiti tramite fotogrammetria aerea e terrestre, nell'ottica di simulare sia una diminuzione dei tempi di acquisizione che una riduzione dei tempi di processing dei dati.

Tabella 7.12: Specifiche tecniche degli strumenti utilizzati per la raccolta dei dati.


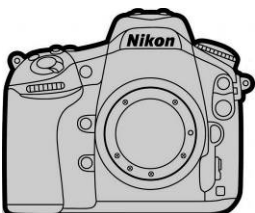
	Drone	Fotocamera Reflex
		
Produttore	DJI	Nikon
Modello	Phantom 4 PRO	D800E
Prezzo	1600 €	1750 € (solo corpo macchina)
Sensore	1" CMOS 20 Megapixel	Sensore CMOS da 35,9 x 24,0 mm 36,3 Megapixel
Lente	35 mm	35 mm
Messa a fuoco	Da f/2.8 a f/11	da f/1.8 a f/16
ISO	100 - 3200	100 - 6400
Velocità otturatore	8s – 1/8000s	30s – 1/8000s
Dimensione immagine	4096 x 2160 pixels	7360 x 4912 pixels
Risoluzione video	4096 x 2160 (30 fps), 2720 x 1530 (60 fps)	1.920 x 1.080
Formato foto	JPEG e DNG (RAW)	NEF (RAW), TIFF e JPEG
Formato video	MP4 e MOV	MOV
Schede SD	Micro SD; Capacità massima 128 GB	2 slot SD



Figura 7.9: Il drone DJI Phantom 4 PRO in una fase del rilievo della bifora dissestata.



Figura 7.10: Dispositivo di controllo del drone.

Per le operazioni di generazione delle nuvole di punti, densificazione e generazione di mesh texturizzate per tutti i dataset esaminati in questo paragrafo è stato utilizzato il software Agisoft PhotoScan.

Per entrambi i progetti è stato creato un dataset contenente l'integrazione dei dati raccolti dai due sensori. Successivamente, seguendo il workflow operativo del software, si è proceduto alla generazione della nuvola di punti. Si è proceduto quindi alla densificazione delle nuvole di punti e alla generazione di mesh texturizzate per entrambi i file di progetto.

Per l'elaborazione dati dei due progetti sono stati utilizzati parametri diversi (Tabella 7.13).

Tabella 7.13: Parametri di elaborazione di PhotoScan per i due progetti.

	Ground Truth	Simulazione speditiva
Parametri di allineamento		
Accuratezza	Alta	Alta
Preselezione coppie	Generica	Generica
Limite key point	0	40.000
Limite tie point	0	4.000
Parametri di ricostruzione nuvola		
Qualità	Alta	Alta
Filtro profondità	Aggressivo	Moderato
Parametri di ricostruzione modello		
Qualità	Alta	Alta
Filtro profondità	Aggressivo	Moderato
Parametri di texturizzazione		
Modalità mapping	Generica	Generica
Modalità blending	Mosaico	Mosaico
Dimensione texture	8.192 x 8.192 px	16.384 x 16384 px

La tabella 7.14 illustra le specifiche dei due dataset.

Tabella 7.14: Specifiche dei datasets elaborati tramite il software AGSOFT PhotoScan.

Dataset		Ground Truth	Simulazione speditiva
Dati del rilievo	Immagini calibrate/ immagini totali	322/323	178/178
	Tie points	2,095,898	363,083
	Proiezioni	8,119,801	1,406,013
	Errore di riproiezione	1.64 pix	0.775 pix
	Ground resolution	3.76 mm/pix	1.5 cm/pix
	Area di copertura	2170 m ²	413 m ²
	Risoluzione	Sensori misti	Sensori misti
Control Points	Numero	10	
	Errore X (cm)	0.96733	
	Errore Y (cm)	1.62562	
	Errore Z (cm)	2.21461	
	Errore XY (cm)	1.89166	
	Total (cm)	2.91253	
	Image (pix)	3.733	
Control Scale Bars	Misura 1 – distanza (m)		10.6836
	Misura 1 – errore (m)		0.0126185
	Misura 2 – distanza (m)		7.54813
	Misura 2 – errore (m)		-0.0178669
	Totale errore (m)		0.0154669
Nuvola di punti	Punti	2,095,898 of 2,430,805	363,083 of 424,685
	Errore quadratico medio	0.498118 (1.63533 pix)	0.196647 (0.774921 pix)
	Errore Massimo	31.0732 (70.5858 pix)	0.598292 (50.888 pix)
	Dimensione media key point	3.79151 pix	3.60237 pix
	Sovrapposizione effettiva	4.70471	4.14513
	Punti (Nuvola densa)	51,147,477	37,340,036
Modello	Facce	10,229,494	6,824,146
	Vertici	5,130,846	3,418,880
	Texture	8,192 x 8,192	16,384 x 16,384

Vengono riportati nel dettaglio, da figura 7.11 a figura 7.18 gli step eseguiti per la generazione del modello di Ground Truth (Perri, 2017).



Figura 7.11: Foto da drone del Duomo Vecchio di San Severino Marche.

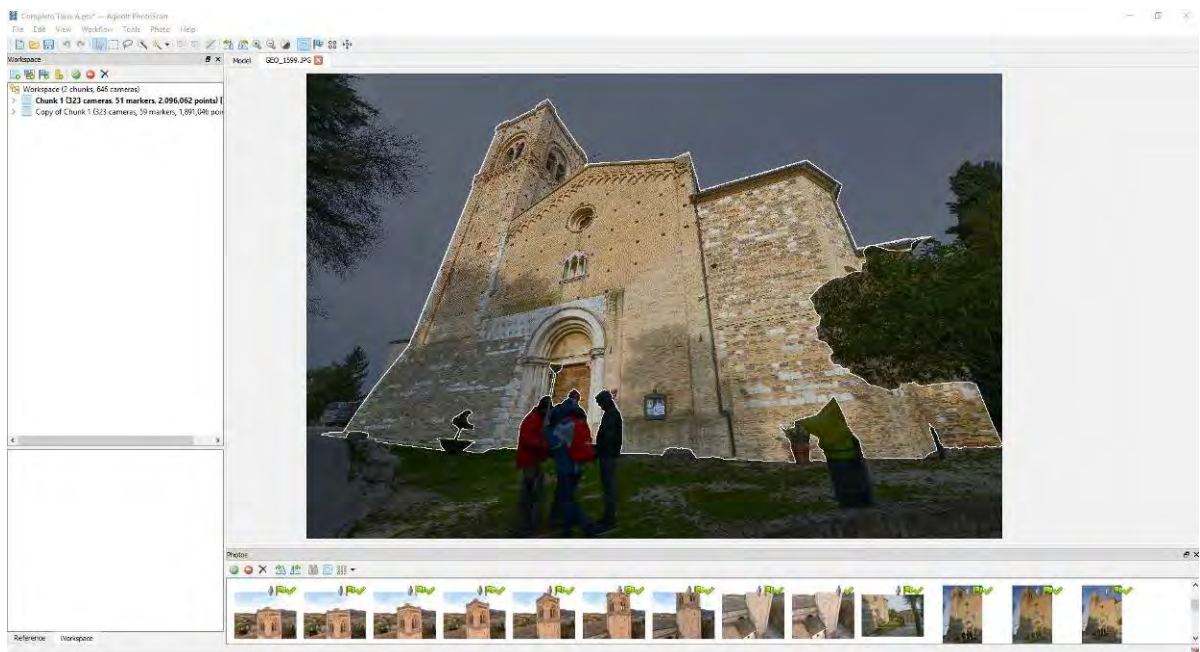


Figura 7.12: Il primo passaggio è stato quello di mascherare le immagini dalle parti non utili alla realizzazione del modello, come contesto ed intorno (Perri, 2017).

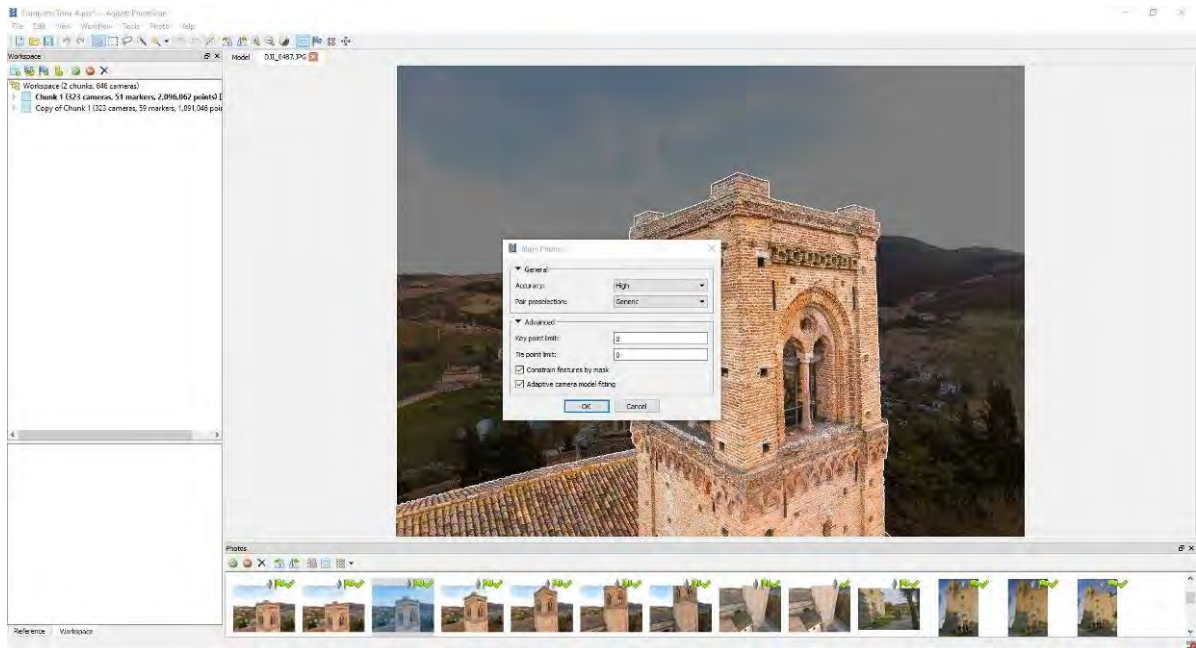


Figura 7.13: In seguito sono state allineate le immagini con Accuraciy “High”, Pair preselection “Generic” e sono state applicate le maschere di selezione nel processo (Perri, 2017).

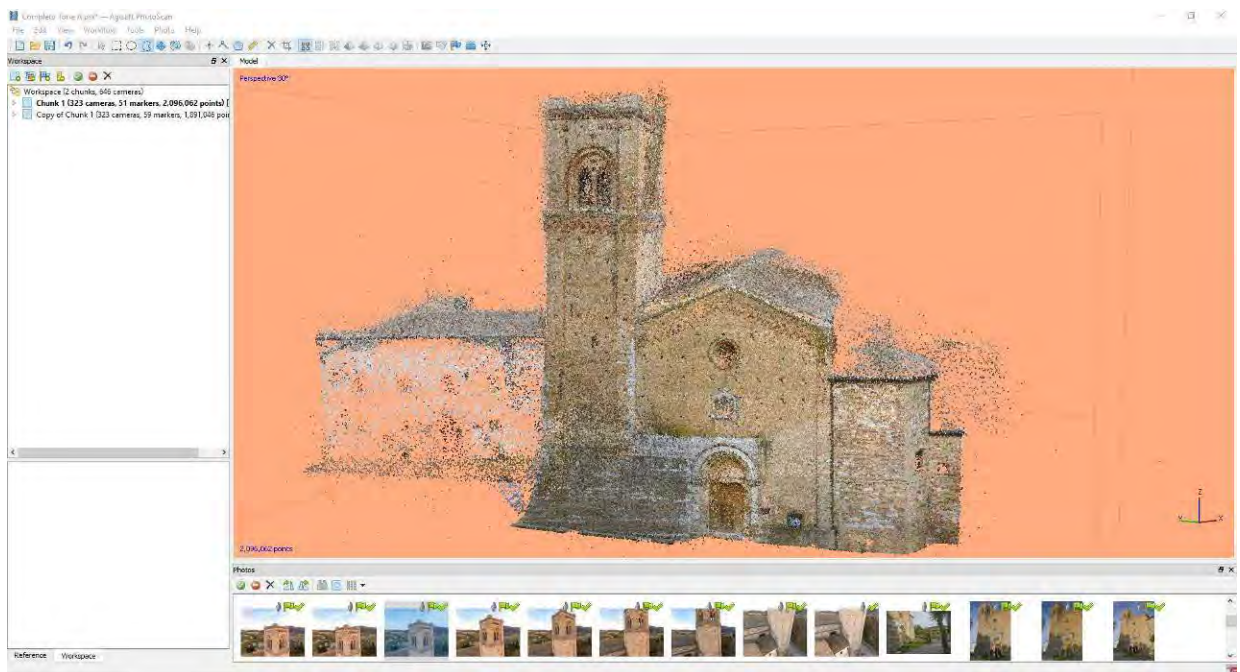


Figura 7.14: Primo allineamento (Perri, 2017).

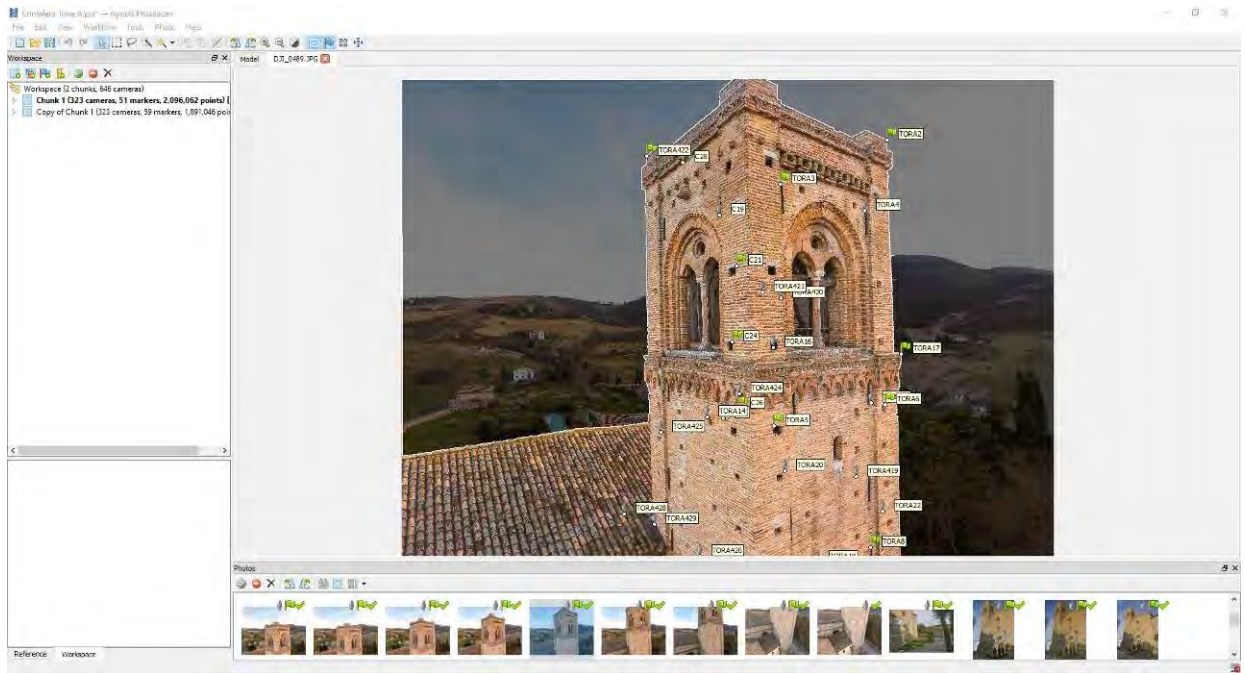


Figura 7.15: Una volta ultimato l'allineamento, le immagini sono state ottimizzate ed inseriti i punti di coordinate presi sull'oggetto. Sono stati inizialmente inseriti 59 punti (Perri, 2017).

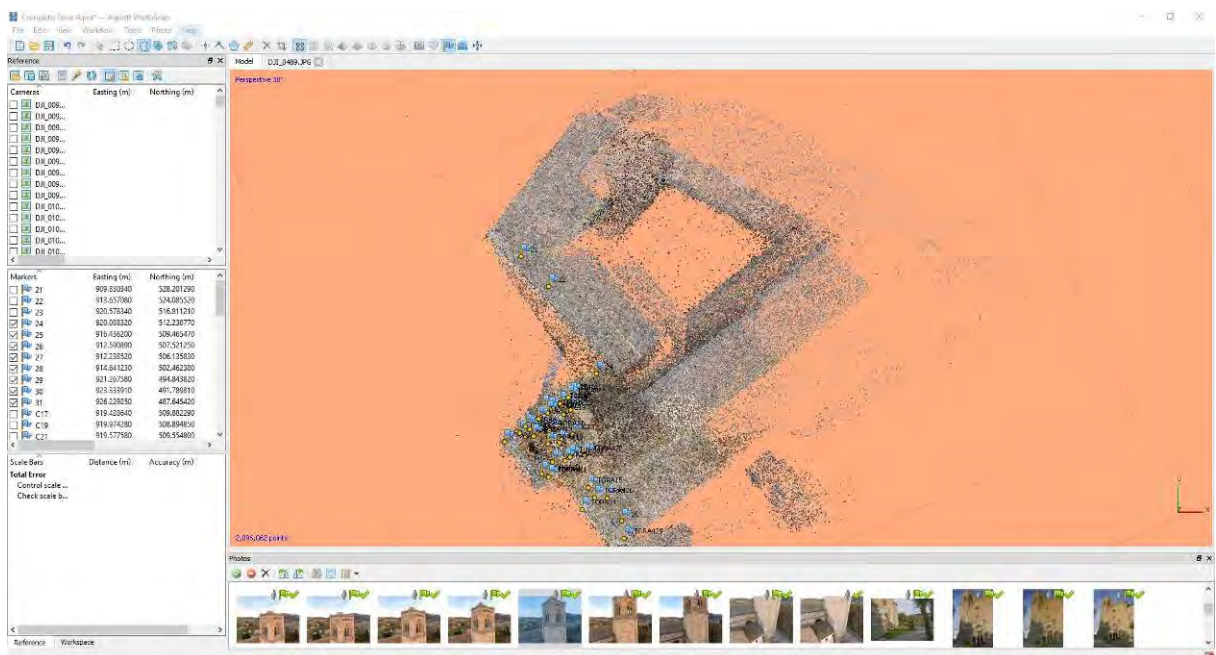


Figura 7.16: Rototraslazione (Perri, 2017).

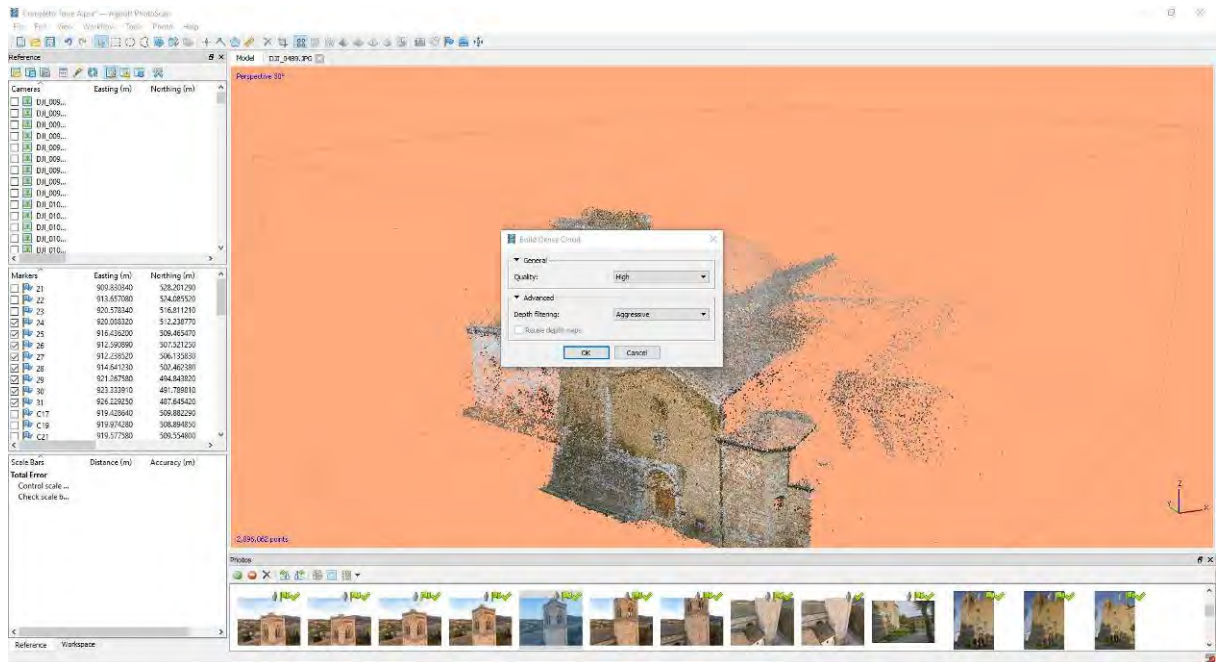


Figura 7.17: Successivamente alla rototraslazione è stata elaborata la nuvola di punti in Quality “High” e Depth Filtering “Aggressive” (Perri, 2017).

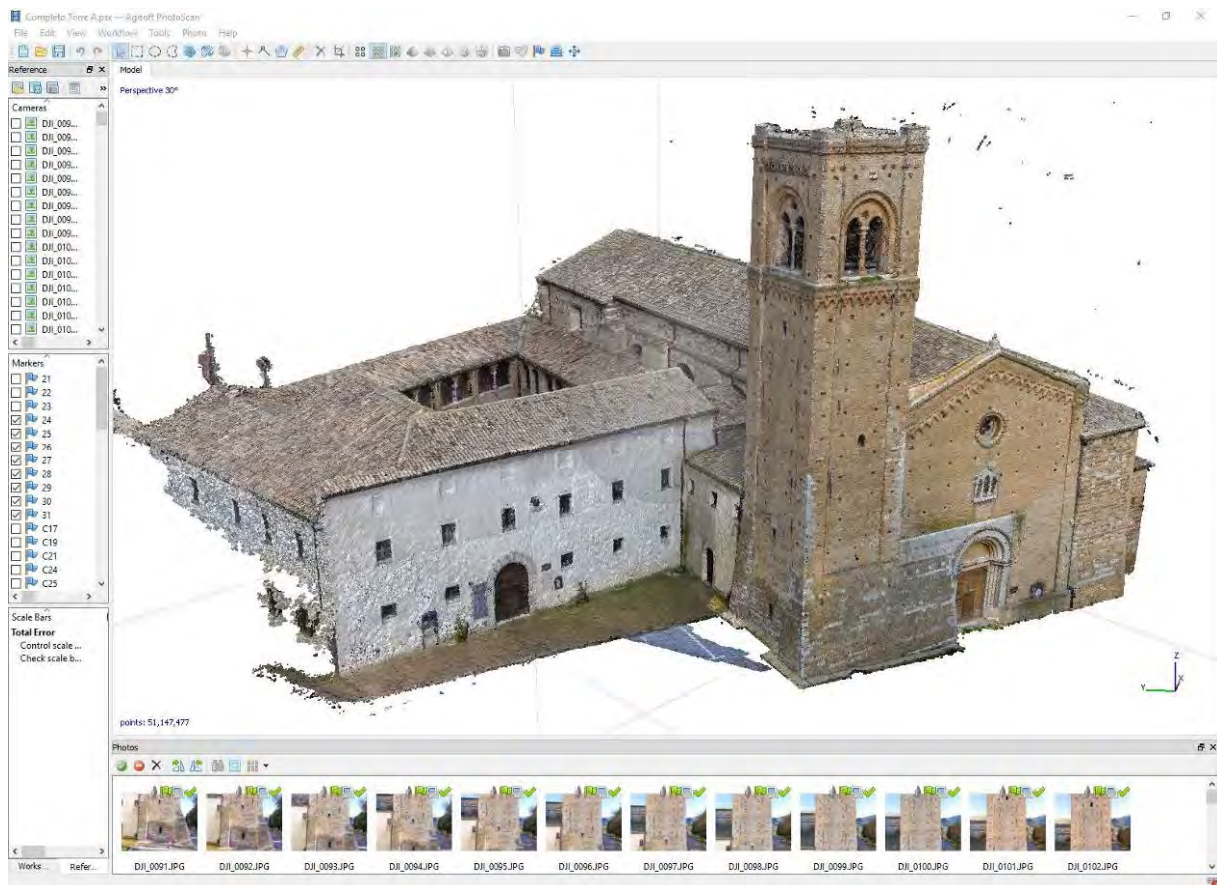


Figura 7.18: Nuvola Densa (Perri, 2017).

Ai fini di questa tesi, per considerare un'eventuale applicazione del metodo proposto per le fasi emergenziali, vengono di seguito riportati alcuni dati sui tempi di acquisizione e di elaborazione relativi ai test svolti (Tabella 7.15).

Tabella 7.15: Tempi di acquisizione e di elaborazione dei due dataset.

Dataset	Ground Truth		Simulazione Speditiva	
	DJI Phantom 4	Nikon D800E	DJI Phantom 4	Nikon D800E
Numero fotogrammi	225	97	148	30
Tempi di acquisizione	17 min	11 min	12 min	4 min
Tempi di elaborazione*	125 h**		9 h	

*Dipende dall'hardware della macchina utilizzata e da eventuali processi contemporanei all'elaborazione; in questo caso è stato utilizzato un PC con Windows 10 PRO 64 bit, Processore Intel Core i7-2600 @ 3.40 GHz (8 CPUs), 24 GB di Ram e due Schede grafiche NVIDIA GeForce GTS 450.

**Al netto del mascheramento dei fotogrammi e del posizionamento dei Control Points.

Sono stati successivamente analizzati gli errori medi relativi a ciascun dataset (Tabella 7.16); per errore medio si intende la differenza media, in metri, tra le posizioni dei punti (o le distanze misurate) e importate dall'utente, e quelle stimate dal software nel primo allineamento.

Tabella 7.16: Errori medi dei vari dataset relativi ai test condotti sul complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC).

	Ground truth		Simulazione speditiva	
	<i>m</i>	<i>px</i>	<i>m</i>	<i>px</i>
Control Points	0.002912	3.733	-	-
Check Points	0.002932	3.230	-	-
Control Scale bars	-	-	0.015466	-
Check Scale bars	-	-	0.014592	-

Gli errori in questione si collocano ampiamente sotto il centimetro (ordine di grandezza millimetrico) per il modello di ground truth, mentre di circa 1,5 cm per il modello speditivo. Pertanto i risultati ottenuti possono considerarsi accettabili per gli scopi proposti.

Per le operazioni di gestione delle nuvole di punti, confronto e analisi, è stato utilizzato il software commerciale 3DReshaper, prodotto da Technodigit-Hexagon.

Le nuvole di punti generate tramite PhotoScan sono state esportate, al fine di importarle successivamente in un nuovo file di 3DReshaper. Le nuvole di punti sono state inizialmente allineate mediante il comando “best-fit”; questo comando analizza i modelli trovando la soluzione che minimizzi gli errori di allineamento relativo. Un allineamento delle coppie di modelli generati dai due dataset è condizione necessaria per poter analizzare gli scostamenti, intesi come la distanza media tra i punti dei modelli esaminati.

A seguito dei best fit eseguiti sui due modelli, si riportava un **errore medio di 0,067 m** e una **deviazione standard di 0,093 m** a seguito della trasformazione. È importante precisare che il comando non altera la scala dei modelli, ma esegue solamente operazioni di rototraslazione.

Gli errori sono risultati elevati, pertanto si è deciso di ritagliare il modello (Figura 7.19), considerando quindi la parte comprendente la sola facciata e il campanile (Figura 7.20).

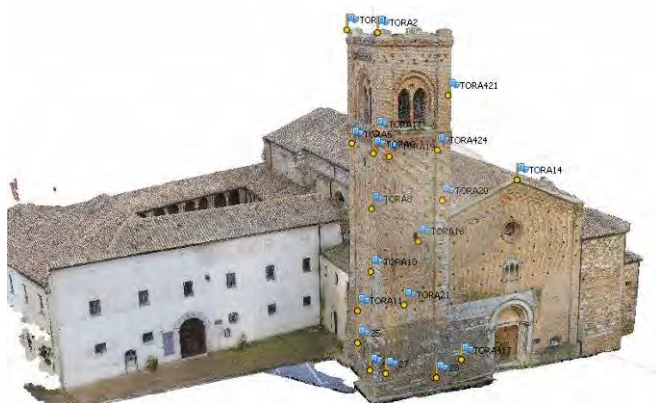


Figura 7.19: Modelli sovrapposti prima del ritaglio.



Figura 7.20: Modelli sovrapposti dopo il ritaglio.

A seguito di un ulteriore best fit, si riportava un **errore medio di 0,048 m** e una **deviazione standard di 0,070**. Si è proceduto quindi al confronto dei due modelli (Tavola 7).



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento di Architettura e Design

**Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città**

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

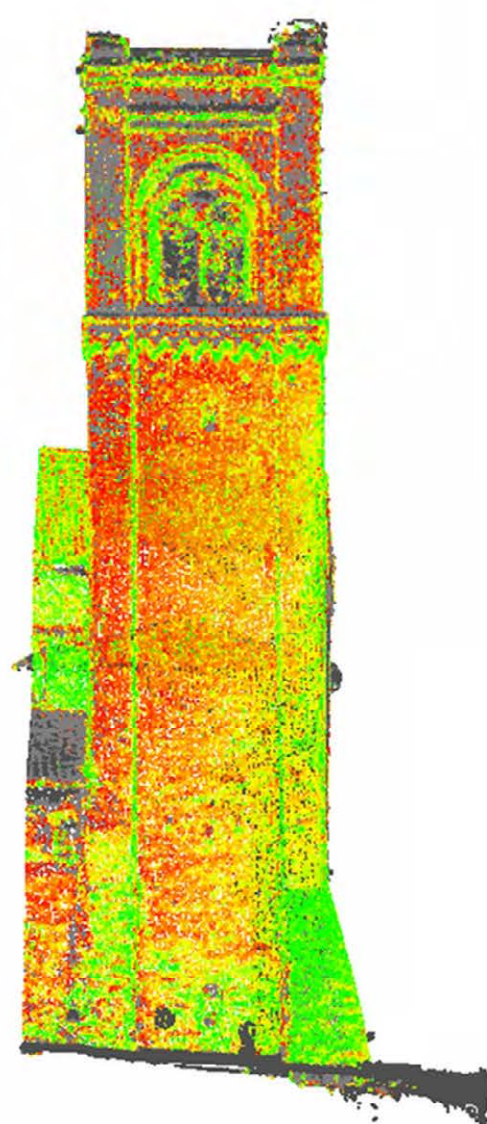
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 7

Confronto tra le nuvole di
punti generate tramite control
points e tramite scale bars
(Fotocamera DJI Phantom 4)

Duomo Vecchio di
San Severino Marche



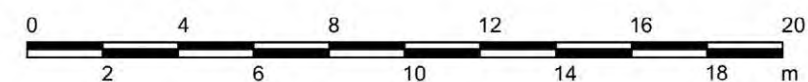
PROSPETTO OVEST



PROSPETTO SUD



SCALA 1:200



La barra a destra permette di associare ad ogni colore un valore, misurato in metri, relativo allo scostamento tra i due modelli confrontati. La percentuale indica la quantità di punti del modello che si trovano ad una determinata distanza relativa. In altri termini si potrebbe affermare che le aree tendenti al verde sono quelle che risultano geometricamente coerenti in entrambi i modelli.

Il valore di cinque centimetri è stato posto come valore massimo della scala, considerando che in questo caso il modello costituisce una porzione più ampia, e quindi finalizzato a un rilievo geometrico non di dettaglio.

I punti del grafico colorati in grigio rappresentano coppie di punti relativi ai due modelli aventi una distanza superiore ai cinque, e pertanto esclusi dal confronto.

Con l'obiettivo di ricavare misure che possano essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto per la realizzazione di un'opera provvisoria sulla bifora del campanile, i modelli sovrapposti sono stati ulteriormente ritagliati, includendo solamente la porzione della finestra, al fine di diminuire al massimo gli errori.

A seguito di un ulteriore best fit limitato alla porzione della bifora del campanile, si riportava un **errore medio di 0,026 m** e una **deviazione standard di 0,034**. Si è proceduto quindi al confronto dei due modelli (Tavola 8).

È risultato altresì interessante il confronto di una sezione verticale, generata per mezzo dell'apposito comando "create along axis". La sezione è stata generata contemporaneamente in entrambi i modelli, permettendo in seconda istanza di effettuare un confronto puntuale dello scostamento (Tavola 9). Anche in questo caso la barra a destra permette di associare ad ogni colore un valore, espresso in metri, indice della distanza del relativo punto tra i due modelli.

I valori massimi di scostamento analizzati sono stati fissati, in questo caso, ai valori di +0,05 m e -0,05 m per consentire un'analisi più accurata. Gli stessi valori massimi risultano evidenziati con dei riquadri in ognuna delle sezioni generate.

Si può osservare come gli scostamenti non consentirebbero una progettazione sufficientemente precisa dell'opera provvisoria. Possiamo pertanto affermare che in questo caso il metodo speditivo può essere considerato un supporto di elevato profilo, senza però prendere il risultato come guida esatta al dimensionamento. Ciò si verifica quando gli elementi architettonici tenuti in considerazione (bifora) risultano essere lontani dalla posizione delle scale bars di riferimento (ai piedi del campanile).



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

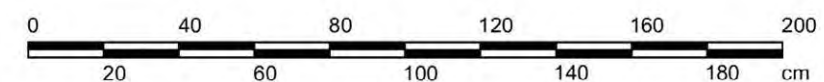
TAVOLA 8

Confronto tra le nuvole di
punti generate tramite control
points e tramite scale bars
(Fotocamera DJI Phantom 4)

Bifora ovest del campanile
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



SCALA 1:20





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

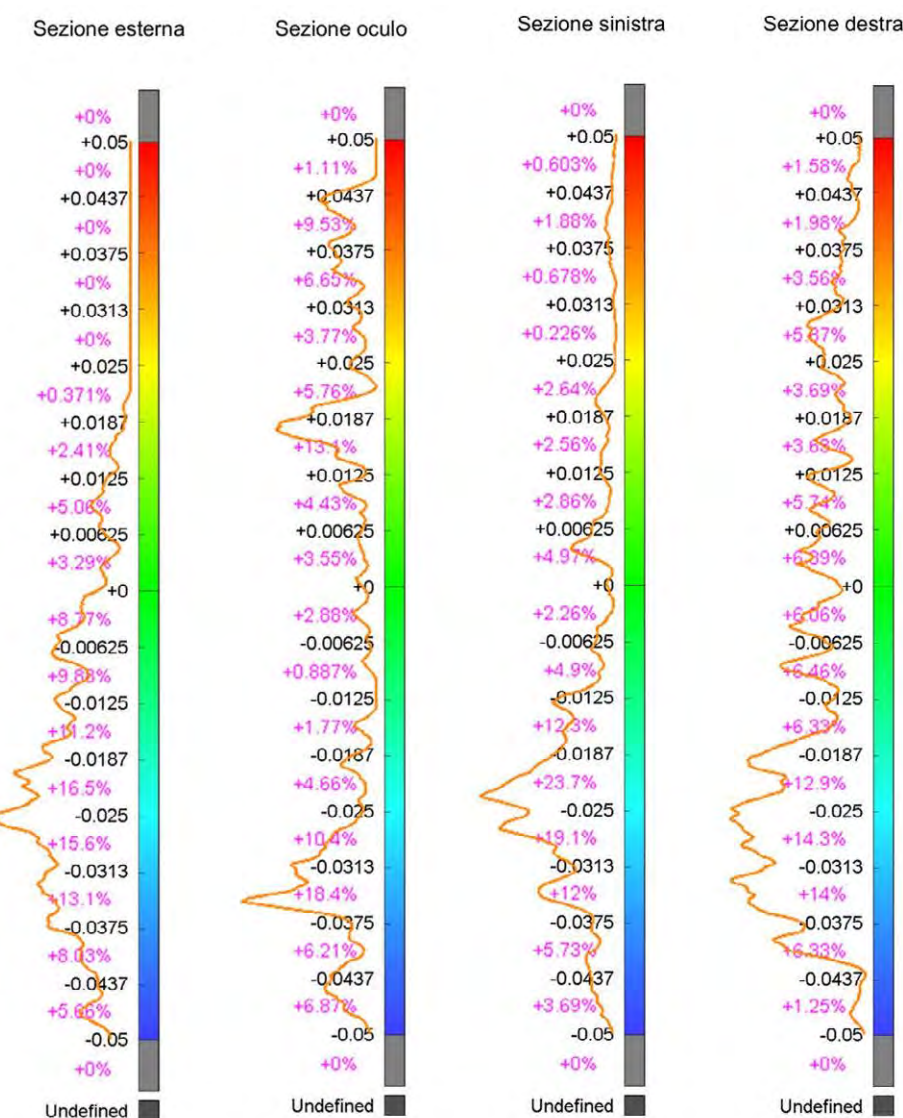
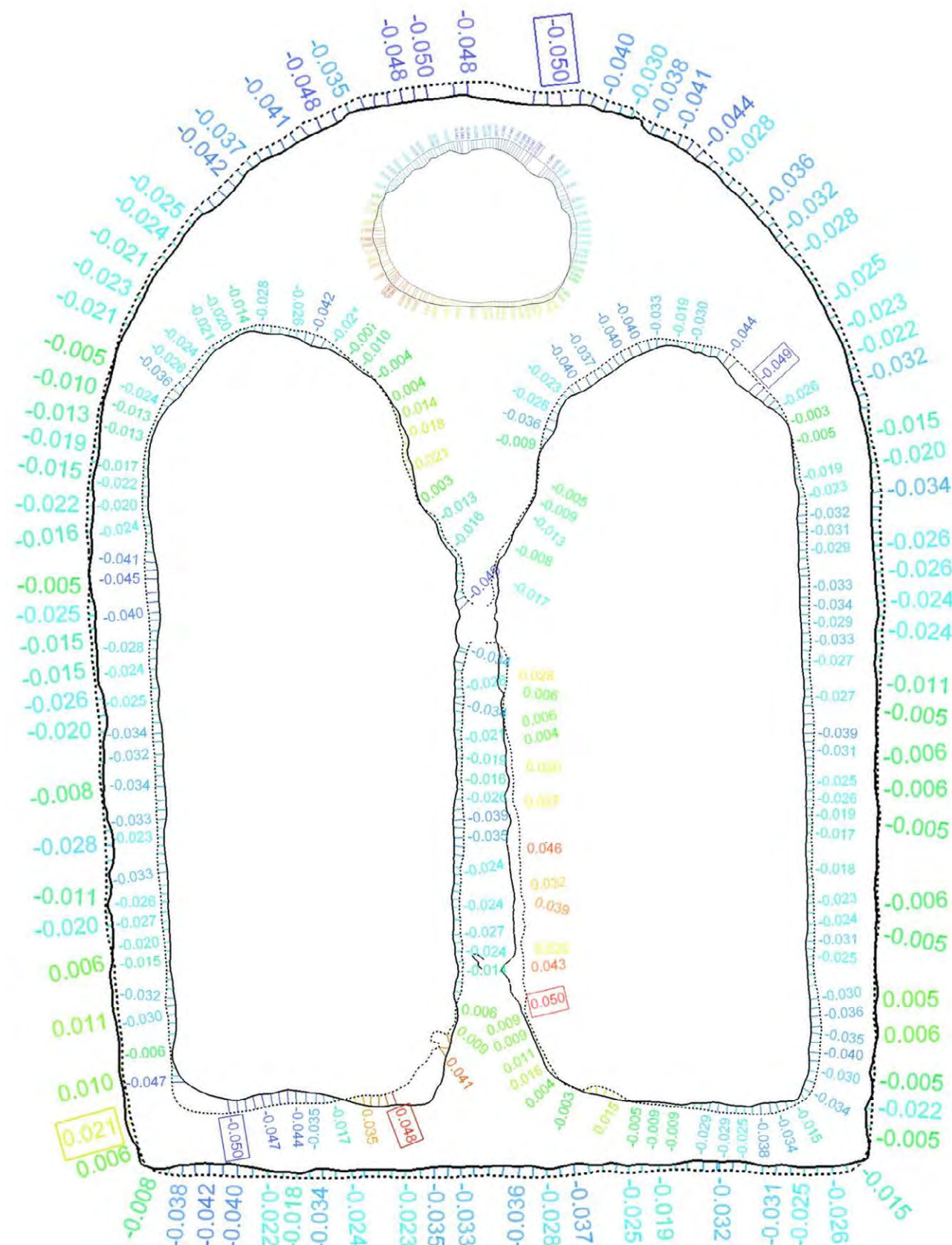
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 9

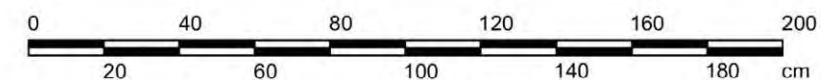
Confronto tra le nuvole di punti generate tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera DJI Phantom 4)

Bifora ovest del campanile
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



— Sezione di modello generato tramite scale bars
- - - Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)

SCALA 1:20



Per verificare questa ipotesi, si è deciso pertanto di condurre un ulteriore test sul portale centrale del Duomo vecchio, scalando il modello fotogrammetrico utilizzando una sola misura.

Il dataset di ground truth è stato rivisto, mantenendo solamente 4 control points e 2 check-points, scegliendo tra tutti quelli situati nelle immediate vicinanze del portale. Anche il dataset della simulazione speditiva è stato rivisto, utilizzando in questo caso le misure di altezza e larghezza del portale principale (Tabella 7.17).

Tabella 7.17: Misure acquisite mediante rotella metrica.

ID Scale bar	Distanza (m)
Larghezza	2,410
Altezza	3,179

Sono stati successivamente analizzati gli errori medi relativi a ciascun dataset (Tabella 7.18); per errore medio si intende la differenza media, in metri, tra le posizioni dei punti (o le distanze misurate) e importate dall'utente, e quelle stimate dal software nel primo allineamento.

Tabella 7.18: Errori medi dei vari dataset relativi ai test condotti sul portale principale del Duomo Vecchio di San Severino Marche (MC).

	Ground Truth		Simulazione Speditiva	
	<i>m</i>	<i>px</i>	<i>m</i>	<i>px</i>
Control Points	0.019314	1.600	-	-
Check Points	0.018501	0.832	-	-
Control Scale bars	-	-	0.002456	-

Con l'obiettivo di ricavare misure che possano essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto volto alla realizzazione di un'opera provvisoria sul portale principale, i modelli sovrapposti sono stati ulteriormente ritagliati, includendo solamente la porzione del portale, al fine di diminuire al massimo gli errori.

A seguito di un ulteriore best fit limitato alla porzione della bifora del campanile, si riportava un **errore medio di 0,004 m** e una **deviazione standard di 0,007**. Si è proceduto quindi al confronto dei due modelli (Tavola 10).

Come nei casi precedenti sono state generate delle sezioni verticali per entrambi i modelli, che sono state confrontate. Anche in questo caso la barra a destra permette di associare ad ogni colore un valore, espresso in metri, indice della distanza del relativo punto tra i due modelli.

I valori massimi di scostamento analizzati sono stati fissati, in questo caso, ai valori di +0,015 m e -0,015 m per consentire un'analisi più accurata. Gli stessi valori massimi risultano evidenziati con dei riquadri in ognuna delle sezioni generate.

Le tavole 11, 12, 13 e 14 illustrano i confronti eseguiti sulle sezioni (Figura 7.21) estratte sia dal modello di Ground Truth che da quello della Simulazione speditiva.

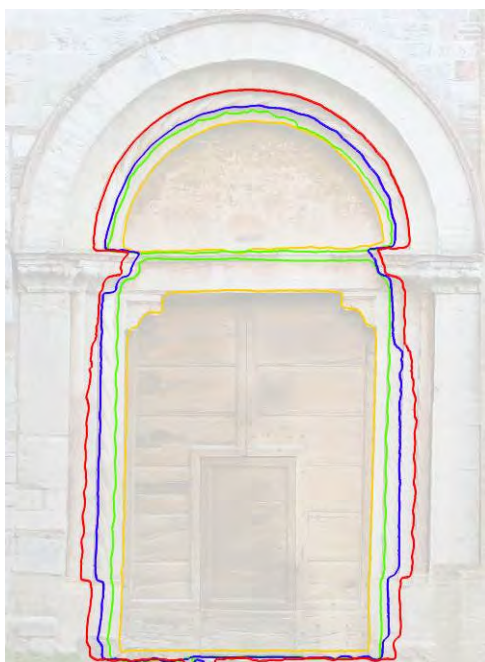


Figura 7.21: Posizione delle sezioni analizzate nelle tavole 11, 12, 13 e 14.

Si può osservare come gli scostamenti siano in media ampiamente sotto il mezzo centimetro. Possiamo pertanto affermare che **il metodo descritto risulta qualitativamente e quantitativamente molto appropriato** per il rilievo delle caratteristiche geometriche dell'elemento architettonico, nella misura in cui le scale bars sono vicine o preferibilmente misurate direttamente sull'elemento da rilevare.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

**L'utilizzo dei droni
per la sicurezza nei cantieri
e negli interventi tecnici
in emergenza sismica**

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

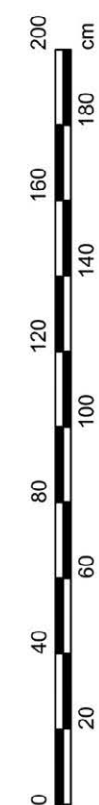
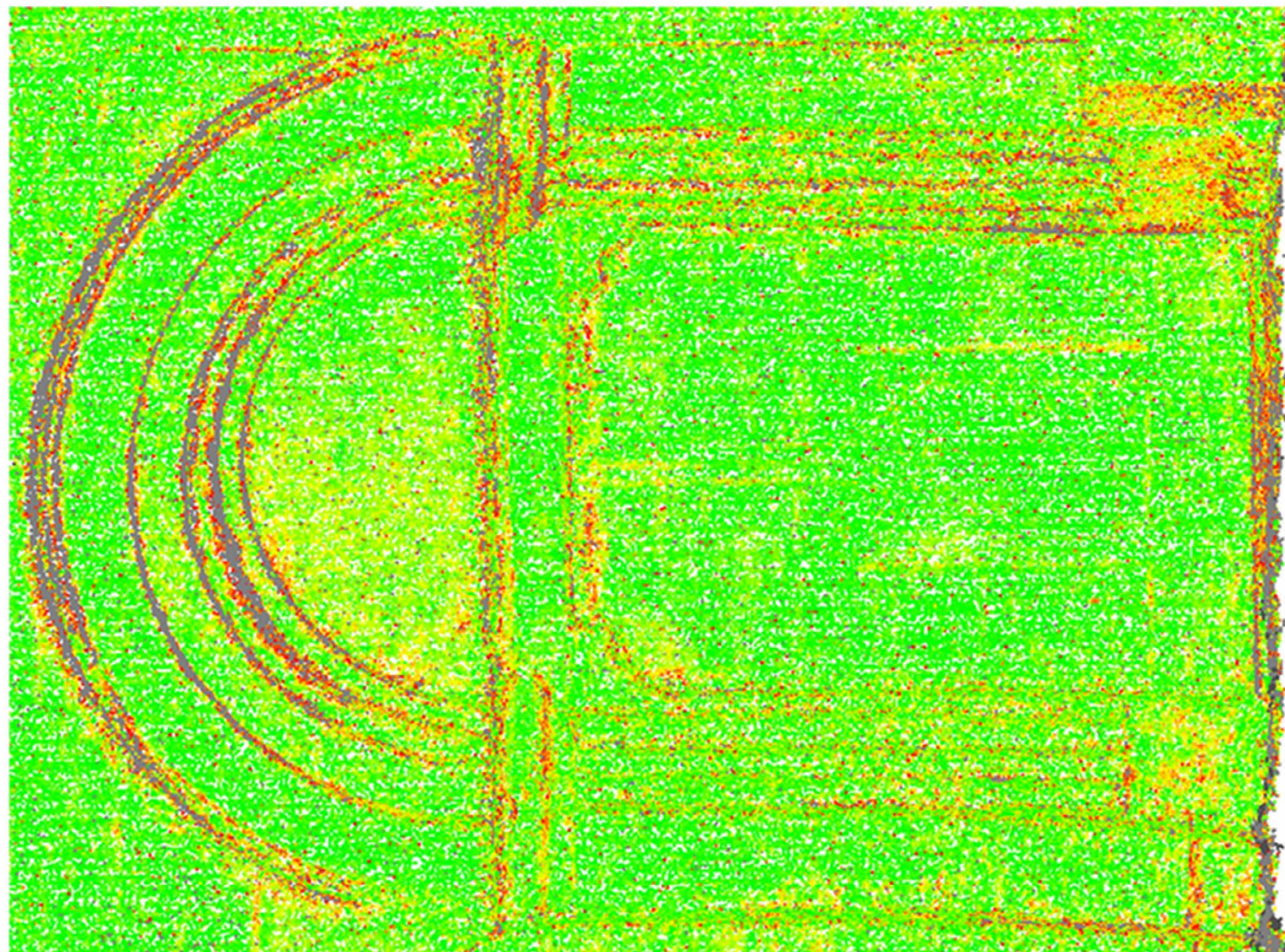
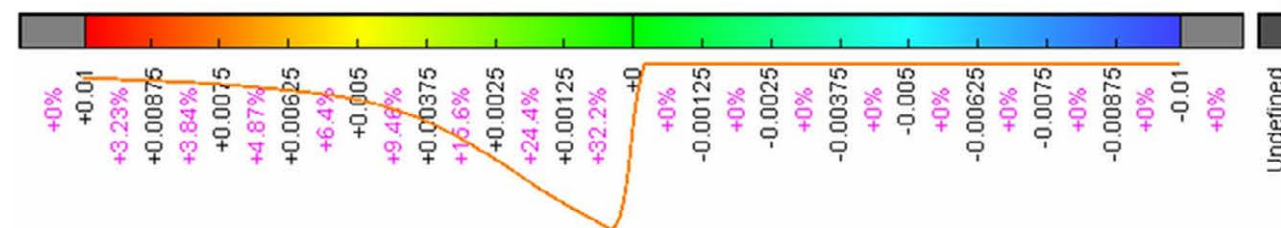
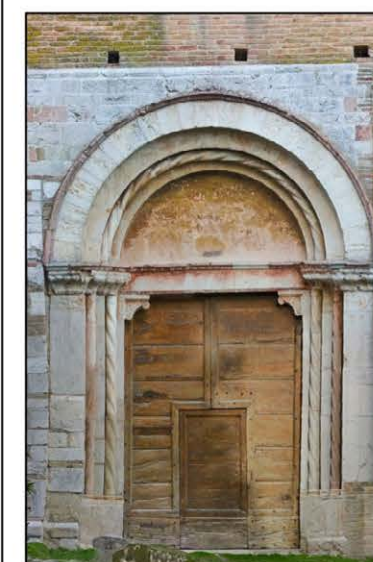
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

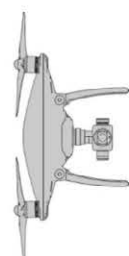
TAVOLA 10

Confronto tra le nuvole di
punti generate tramite control
points e tramite scale bars
(Fotocamera DJI Phantom 4)

Portale principale
Duomo Vecchio di
San Severino Marche

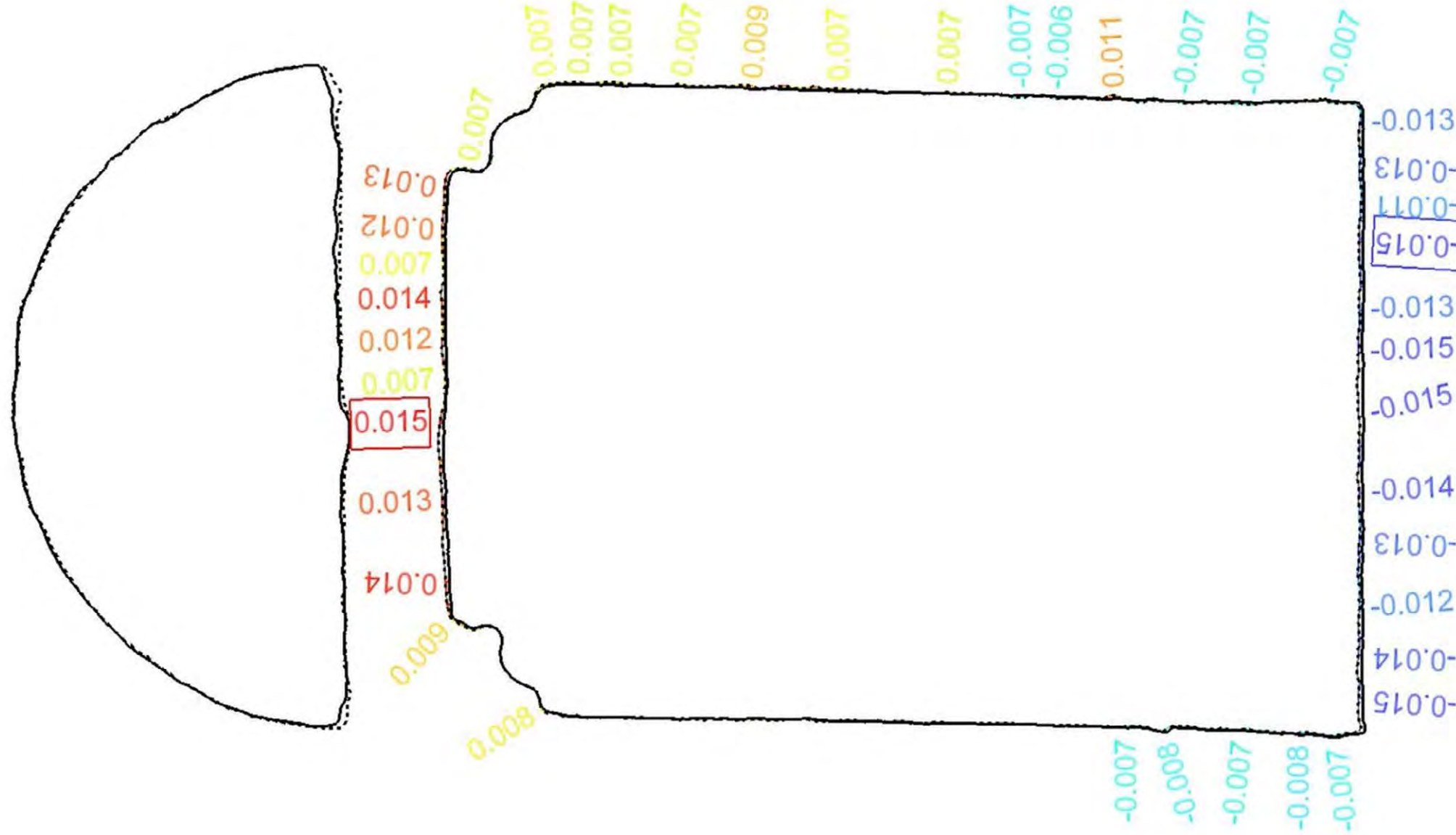


SCALA 1:20

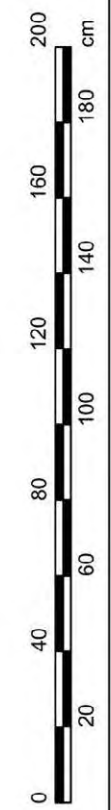




Sezione



Sezione di modello generato tramite scale bars
 Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design
Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
 Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

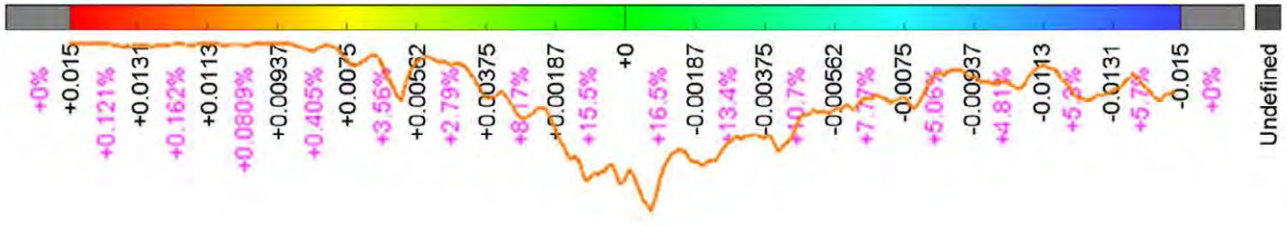
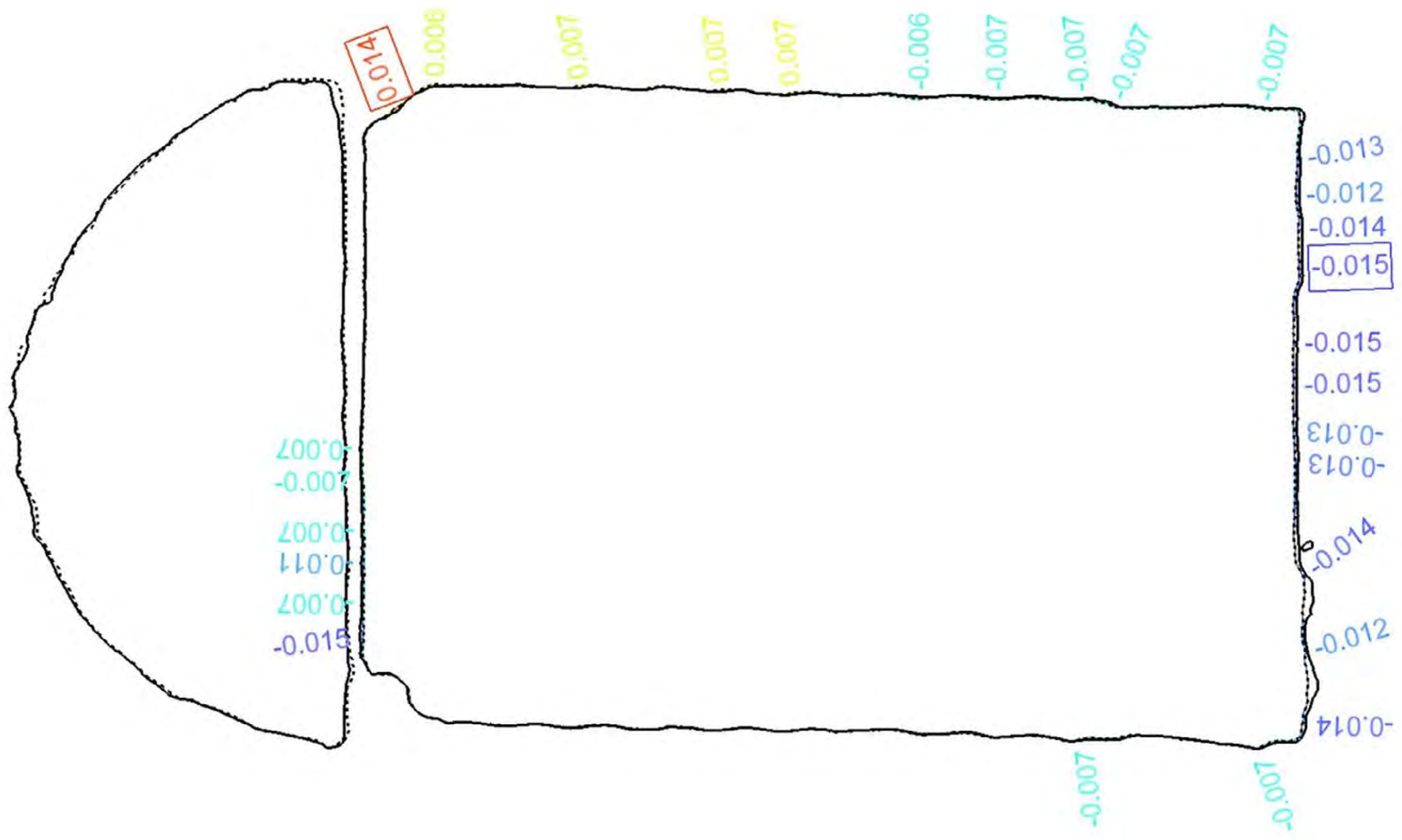
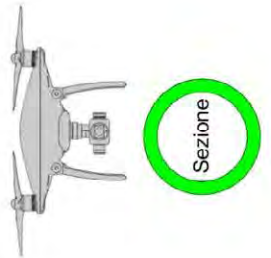
TAVOLA 11

Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera DJI Phantom 4)

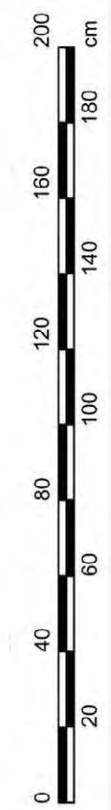
Portale principale
 Duomo Vecchio di San Severino Marche



SCALA 1:20



Sezione di modello generato tramite scale bars
 Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)



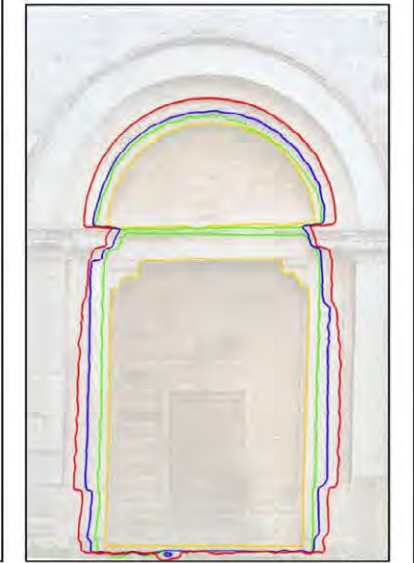
SCALA 1:20



POLITECNICO DI TORINO
 Dipartimento di Architettura e Design
Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città
 Tesi di Laurea Magistrale
L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica
Relatori
 Prof.ssa Antonia Spanò
 Arch. Filiberto Chiabrando
Candidato
 Alessio Calantropio
 Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 12
 Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera DJI Phantom 4)

Portale principale
 Duomo Vecchio di San Severino Marche





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

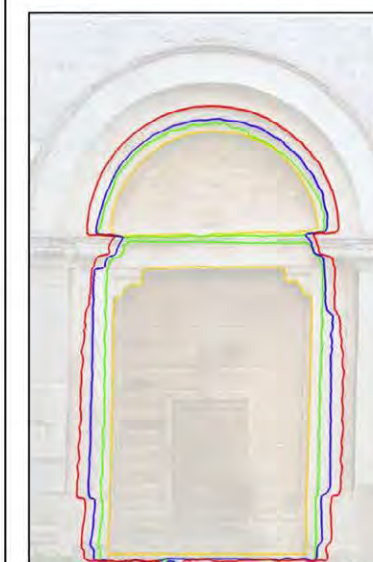
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

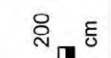
TAVOLA 13

Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera DJI Phantom 4)

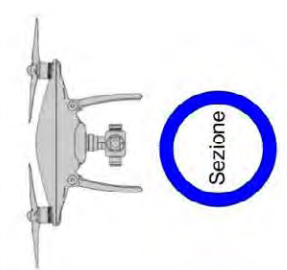
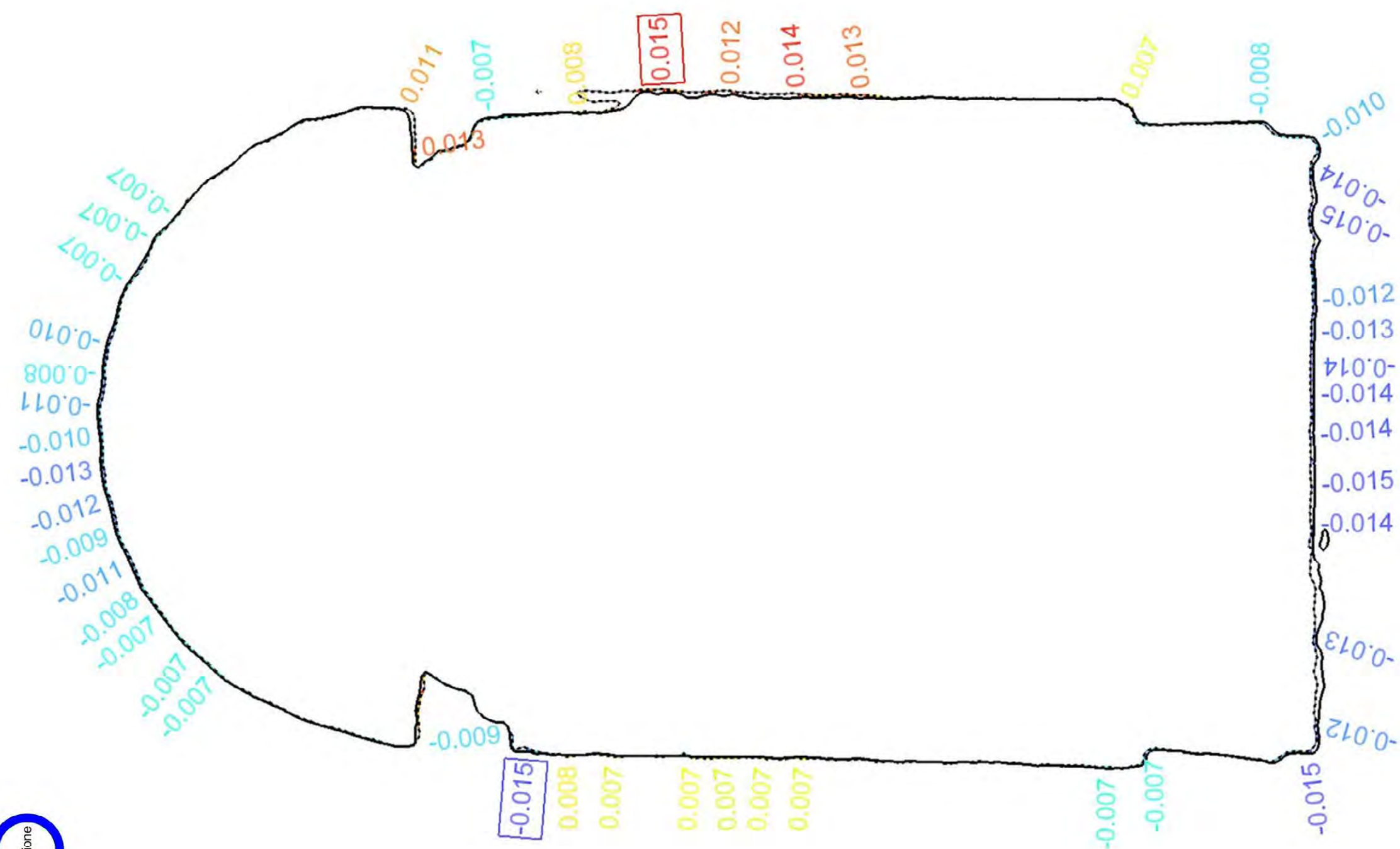
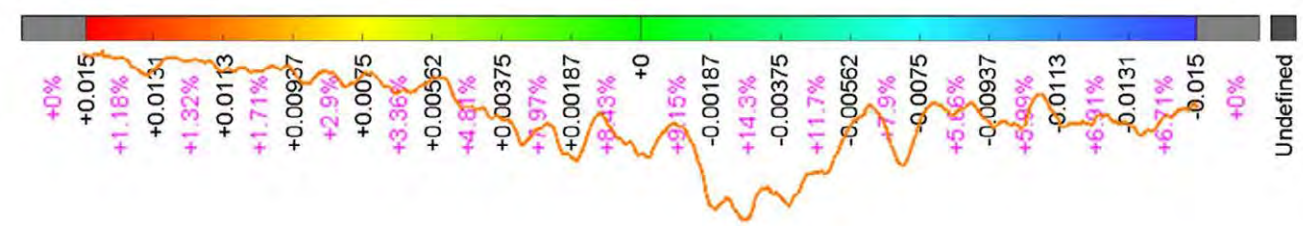
Portale principale
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



Sezione di modello generato tramite scale bars
Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)



SCALA 1:20





POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica

Relatori

Prof.ssa Antonia Spanò
Arch. Filiberto Chiabrando

Candidato

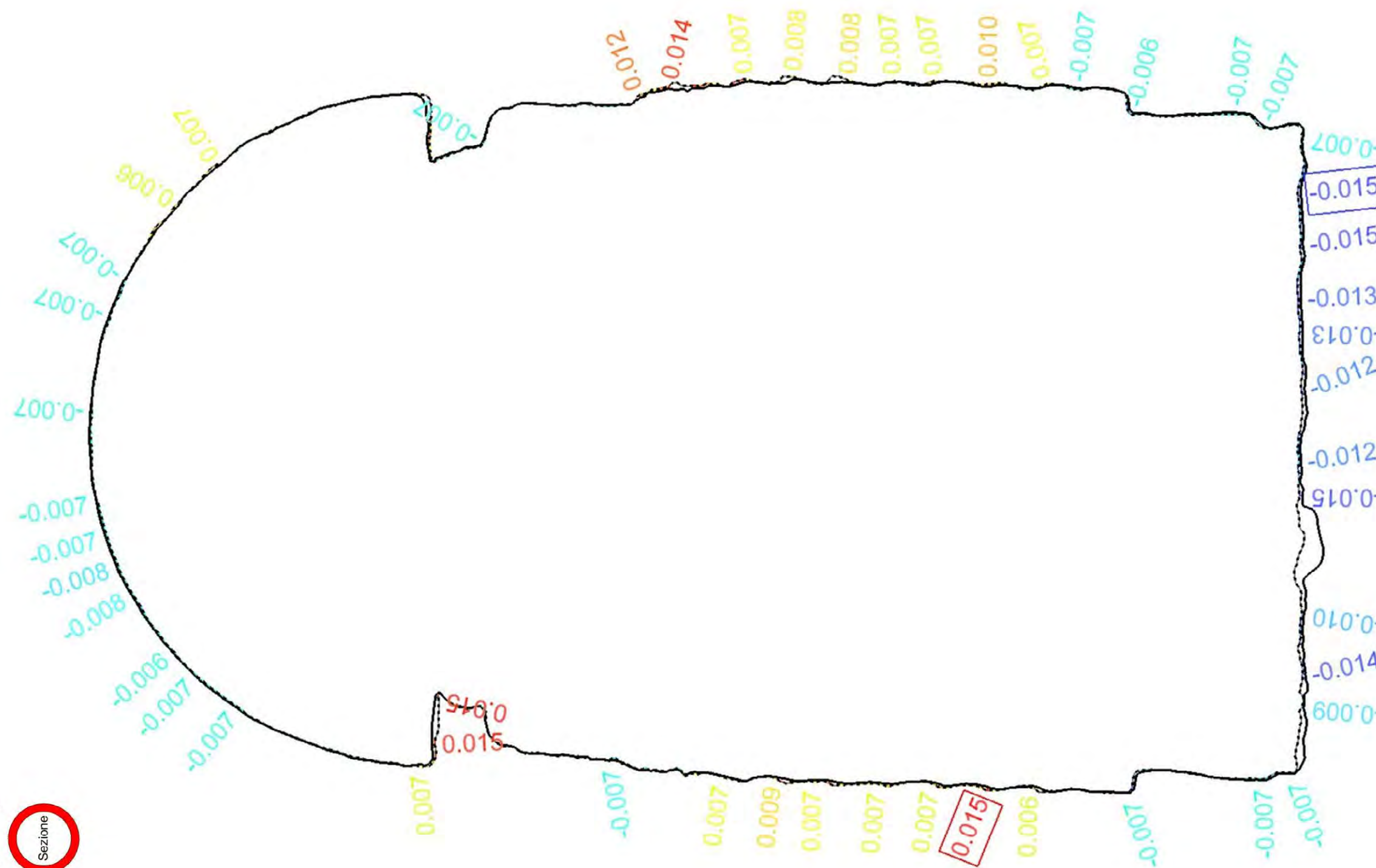
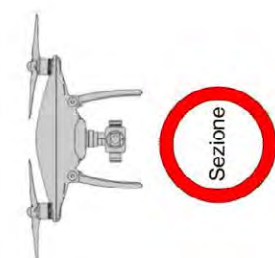
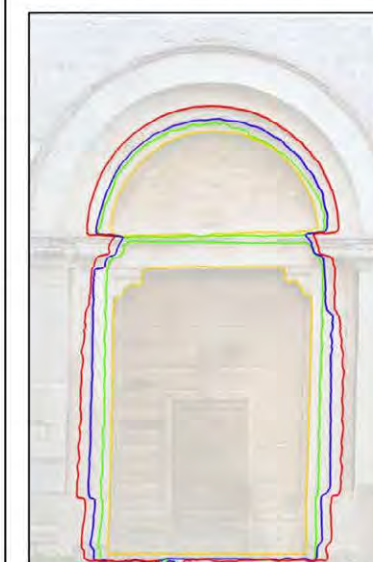
Alessio Calantropio

Anno Accademico 2016 - 2017

TAVOLA 14

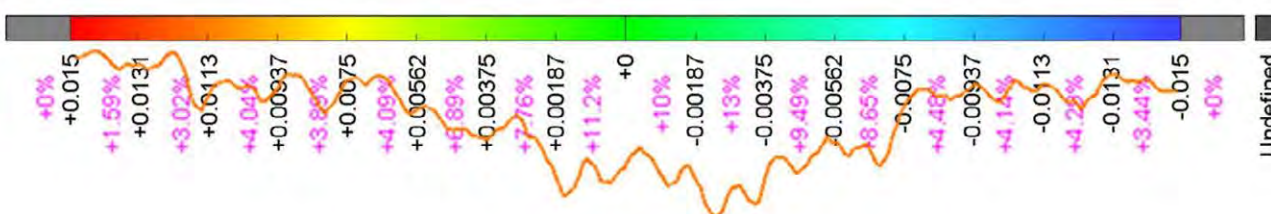
Confronto tra sezioni di modelli generati tramite control points e tramite scale bars (Fotocamera DJI Phantom 4)

Portale principale
Duomo Vecchio di
San Severino Marche



Sezione di modello generato tramite scale bars
Sezione di modello generato tramite control points (ground truth)

SCALA 1:20
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 cm



7.5 Esportazione dei dati metrici per la realizzazione delle opere provvisionali

I dati metrici ottenuti dalle operazioni di rilievo precedentemente illustrate, possono essere utilizzati per la progettazione e il dimensionamento delle opere provvisionali.

Nonostante alcuni degli interventi più semplici consentano la realizzazione di queste opere mediante la semplice applicazione delle schede STOP, per gli elementi di geometria più complessa potrebbe risultare utile l'elaborazione, a monte delle operazioni di produzione e assemblaggio, di uno schema dei componenti da produrre, e la relativa illustrazione mediante opportune tavole di progetto.

L'approccio proposto è quello di utilizzare un comune software CAD per la realizzazione di questi elaborati di progetto. Sarà infatti possibile **esportare** in formato .dxf le varie sezioni create tramite il software 3DReshaper, mediante il comando "export project in DXF file" sotto la voce "Export" del menu principale del software (Figura 7.22).

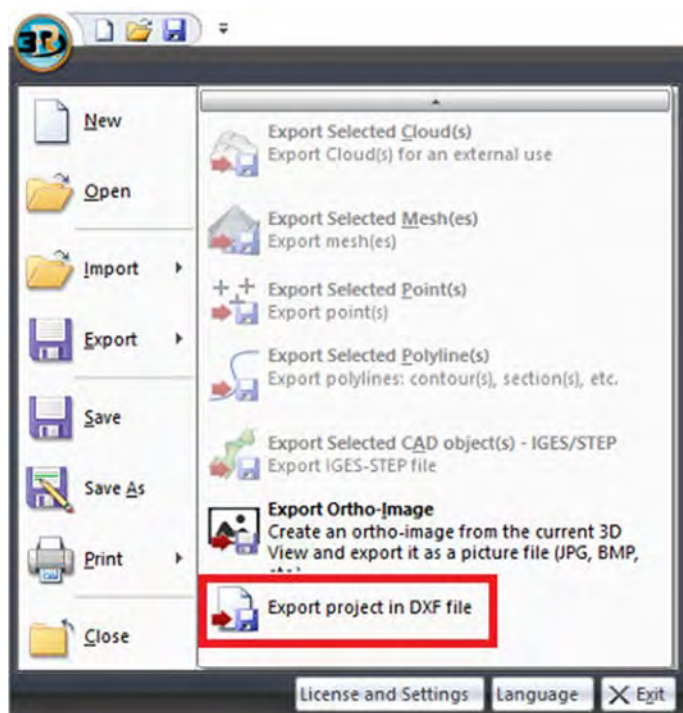


Figura 7.22: Schermata del menu principale del software 3DReshaper che permette di esportare le sezioni analizzate in file DXF per la successiva importazione in un software CAD.

Un'alternativa più rapida, seppur sconsigliata per via della scarsa precisione, è quella di disegnare delle polilinee direttamente sul modello fotogrammetrico generato (Figura 7.23).

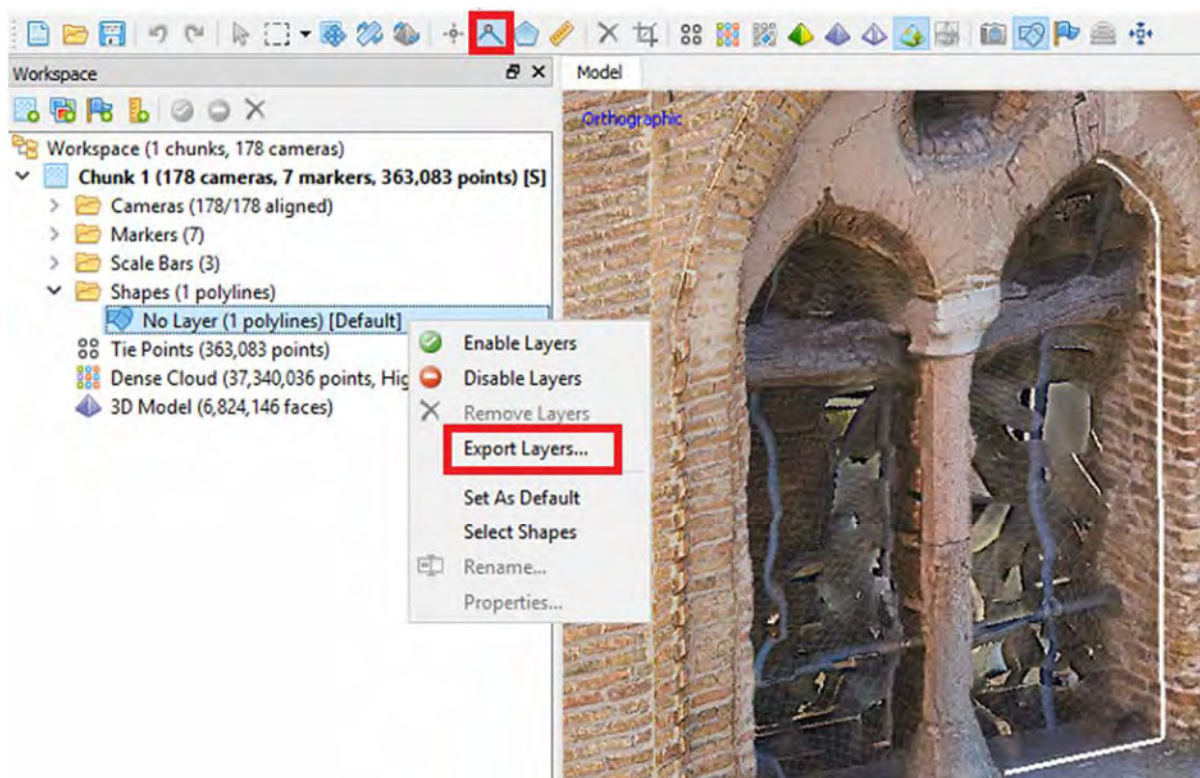


Figura 7.23: Schermata del software PhotoScan che illustra come esportare in un file dxf le polilinee direttamente disegnate sul modello fotogrammetrico, per l'importazione in un software CAD.

Durante lo sviluppo di questa tesi si è scelto di non condurre un approccio orientato al BIM; I motivi di questa scelta risiedono nel fatto che l'HBIM, inteso come applicazione del BIM ai beni culturali, mette forse in crisi una serie di assunti propri del BIM. Soprattutto in contesti emergenziali successivi al sisma, il fatto che gli oggetti architettonici siano incompleti (a causa dei danni), il fatto ogni loro parte sia diversa dalle altre, e il fatto che siano diversi tra loro poiché frutto di modalità costruttive assolutamente diverse, renderebbe molto difficoltoso l'utilizzo di famiglie per la descrizione di oggetti standardizzati volti alla creazione di opere provvisori.

Quando si eseguono delle operazioni di rilievo, ci sono ovviamente delle finalità; **non esiste un metodo che vada bene per tutti i possibili usi**. Nel caso specifico dei beni culturali, non si potrà utilizzare una libreria di oggetti standardizzati; ogni volta che si vorrà creare un modello BIM di un'opera provvisoria per un bene culturale, si dovranno descrivere gli oggetti singolarmente, come in una operazione di catalogazione estensiva, data l'impossibilità di riprodurre in serie gli elementi.

Conclusioni

I droni rappresentano oggi una tecnologia emergente e che sta attirando molta attenzione, data soprattutto la vastità dei campi applicativi a cui si presta, tra i quali ritroviamo anche quelli della Geomatica. Dai test condotti durante la stesura di questa tesi, è emerso che l'utilizzo di sistemi che implementano il volo automatico trova riscontri positivi nella gestione dei cantieri, sia ordinari che emergenziali, al fine di aumentare l'accuratezza delle procedure di rilievo metrico e di diminuire contemporaneamente l'intervento umano ad esse legato.

“Le tecniche di rilievo convenzionali, che utilizzano stazioni totali ad alta precisione, ricevitori GNSS e scanner per le indagini sugli edifici danneggiati, stanno diventando sempre più automatizzate, precise e molto più veloci. Anche se queste tecniche rappresentano strumenti di estrema operatività, esistono ancora molti limiti evidenti sul loro utilizzo, in particolare per quanto riguarda l'indagine dei tetti e delle facciate degli edifici alti o dei luoghi pericolosi tipici delle situazioni post-sisma.” (Baiocchi, et al., 2013). L'utilizzo dei droni in questi contesti emergenziali può superare dunque i limiti e le problematiche legate agli altri strumenti del rilievo metrico (Figura 8.1).

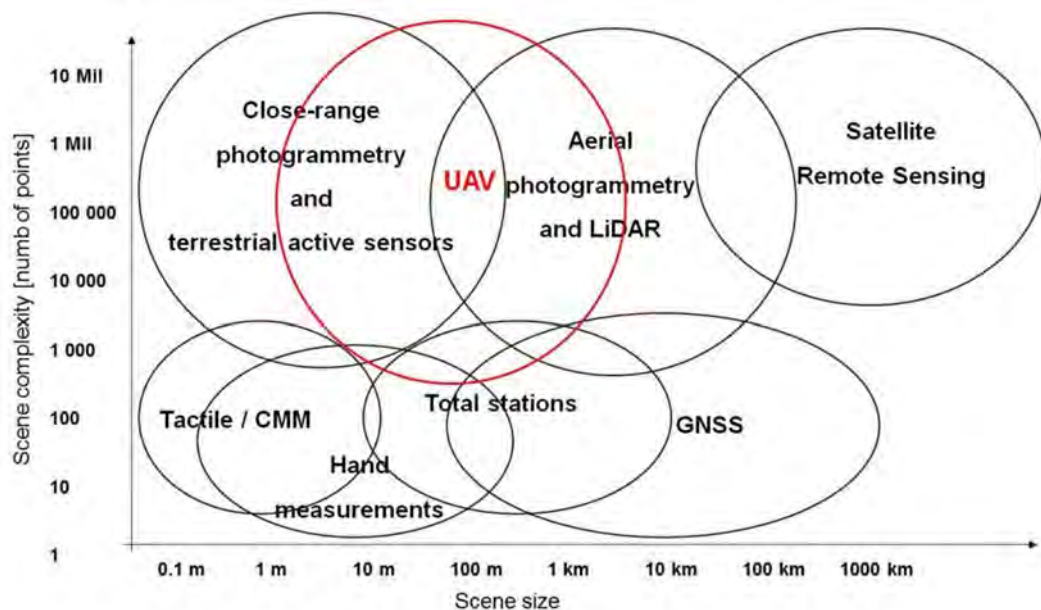


Figura 8.1: Tecniche della Geomatica, sensori e piattaforme disponibili per il rilievo 3D, a seconda della dimensione e della complessità dell'oggetto da rilevare (Nex & Remondino, 2014).

L'impiego della tecnologia UAV nel settore edile può portare vantaggi in diverse applicazioni; quella più immediata è sicuramente la possibilità di analizzare il cantiere dall'alto, ciò fornisce una prospettiva ampia e permette di indagare i dettagli del sito, di identificare meglio gli elementi instabili e i lavoratori in posizioni poco sicure, e di pianificare le movimentazioni dei carichi più rischiose.

Inoltre le immagini raccolte da UAV possono essere impiegate per il mapping e la condivisione dei dati tra le diverse figure tecniche, anche non presenti sul posto, per richiedere consulenze in tempo reale, aumentando la collaborazione partecipativa alla risoluzione delle problematiche operative e progettuali. La possibilità di generare modelli 3D del cantiere, ad intervalli più o meno ravvicinati di tempo, costituirebbe un "archivio storico" del processo costruttivo, che garantirebbe un supporto nelle indagini cronologiche, soprattutto in seguito al verificarsi di un incidente.

A volte si verifica l'esigenza di verificare il corretto utilizzo dei dispositivi di protezione da parte dei lavoratori. Molto spesso osservando un ponteggio dal piano di campagna, non si riescono a cogliere determinati particolari, sia a causa di ostruzioni causate dal contesto che dalla struttura stessa (Figure 8.2 e 8.3). In queste situazioni l'utilizzo di un drone permetterebbe di condurre un'ispezione visiva, rispettando comunque i limiti di distanza dalle persone imposti dalla vigente normativa ENAC, certificate le caratteristiche di inoffensività del velivolo e fatto salvo il divieto di sorvolo di assembramenti di persone.



Figure 8.2 e 8.3: Un lavoratore impegnato nelle operazioni di montaggio di un ponteggio. Le ostruzioni del contesto impediscono al safety manager di valutare il corretto uso dei dispositivi anticaduta.

La sfida più grande nell'utilizzo dei droni nell'industria delle costruzioni è quella di non mettere in pericolo i lavoratori stessi. Le applicazioni future dovranno essere orientate in modo da evitare che i lavoratori possano venire distratti o addirittura colpiti accidentalmente dal drone.

“L’automazione nella raccolta di dati aerei rende queste piattaforme un’alternativa attraente anche per coloro i quali non sono esperti di scienza fotogrammetrica” (DHL Trend Research, 2014). Un interessante esempio è quello fornito da una soluzione dell’azienda americana Identified Technologies, la quale ha sviluppato un sistema chiamato “The Boomerang” per il mapping automatico del cantiere; Dopo aver selezionato la porzione di territorio da rilevare (Figura 8.4) il drone decolla automaticamente e, alloggiando su una piattaforma di decollo e atterraggio dotata di un sistema di sostituzione batteria automatico, può effettuare voli programmati nel tempo (Figura 8.5) offrendo un servizio di mappatura continua (Identified Technologies, 2016).



Figura 8.4: Viene selezionata l’area di cui si richiede l’analisi (Identified Technologies, 2016).



Figura 8.5: La piattaforma di atterraggio e decollo implementa un sistema di sostituzione automatica delle batterie (Identified Technologies, 2016).

È chiaro che questa, come qualsiasi altra tecnologia in grado di assistere la progettazione e il controllo sulla sicurezza, sarebbe solamente complementare alle esistenti procedure e all’addestramento del personale, e non ad esse sostituibile. È altresì impensabile ipotizzare che questi strumenti possano sostituire, in futuro, il ruolo del safety manager; questo perché i sensi umani e l’esperienza giocheranno sempre un ruolo importante nell’identificare e risolvere i problemi.

Uno degli aspetti critici nell’applicare gli approcci descritti in uno scenario emergenziale, potrebbe essere quello degli elevati tempi di elaborazione richiesti. Per far fronte a questo svantaggio i dati raccolti sul campo possono essere sottocampionati per una prima elaborazione, garantendo operazioni di processing più speditive; contemporaneamente è possibile inviare i dati ai centri operativi dislocati sul territorio, per effettuare un’elaborazione più raffinata, che potrà avvenire tramite calcolatori più performanti.

Esplorando il potenziale positivo, così come le attuali limitazioni dei droni, si devono fare i conti con tre importanti fattori: l'avanzamento tecnologico, le restrizioni normative e l'opinione pubblica. Gli avanzamenti tecnologici, sia nel campo della robotica che in senso lato, prevalgono sempre sui cambiamenti sociali, economici e politici (Figura 8.6); da una prospettiva prettamente tecnologica, diverse applicazioni sono già fattibili, ma molte di queste non sono ancora accettate dall'opinione pubblica. Soprattutto le restrizioni normative, le preoccupazioni sulla privacy e sulla sicurezza e l'integrazione nelle prassi operative esistenti sembrano essere le principali sfide da affrontare in questo processo.

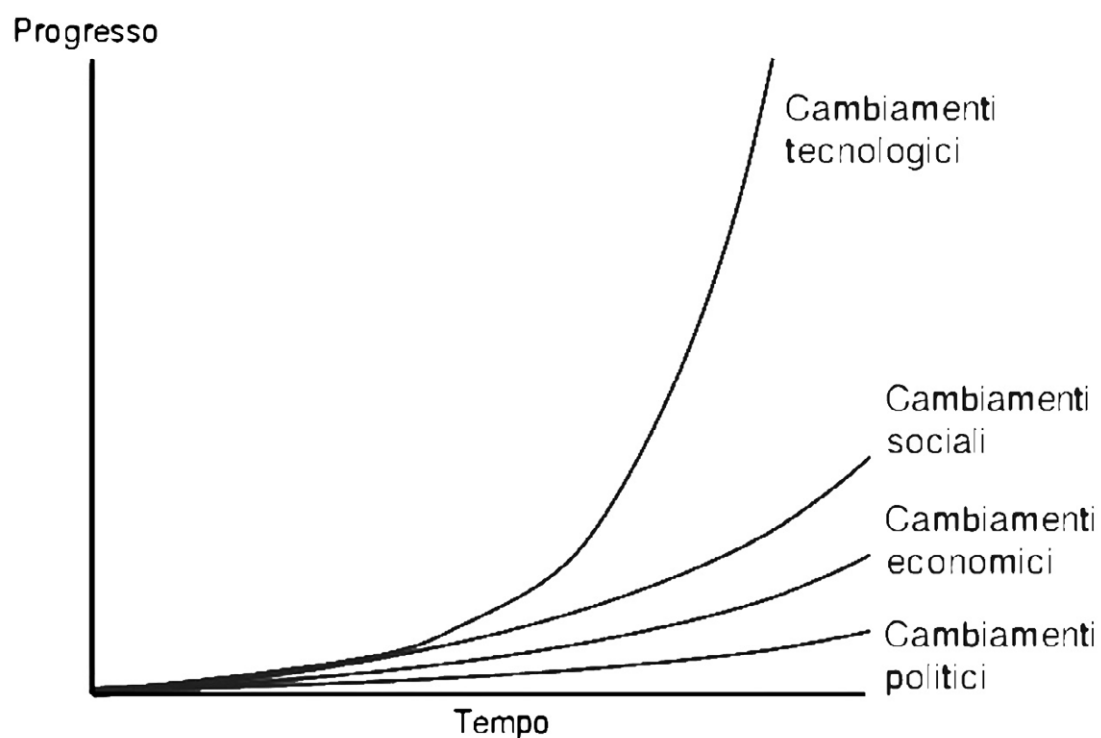


Figura 8.6: “I sistemi sociali, politici ed economici progrediscono incrementalmente, ma la tecnologia progredisce esponenzialmente” (Downes, 2009).

Il ruolo dei ricercatori è oggi di fare un grande sforzo per superare queste sfide; questo può essere fatto guidando il mercato con un ampio approccio interdisciplinare, definendo i requisiti per l'utilizzo dei droni nei contesti analizzati in questa tesi, fornendo soluzioni per migliorare non solo le caratteristiche tecnologiche, ma anche la facilità di utilizzo e l'affidabilità di questi strumenti. Questo permetterà forse, un giorno, di rendere la fotogrammetria da drone altamente integrata nei processi di controllo della sicurezza nei cantieri, sia ordinari che emergenziali.

Lista degli acronimi

Acronimo	Decodifica	Traduzione
3DHOP	3D Heritage Online Presenter	(Software)
ABM	Area Based Matching	(Algoritmo)
AGL	Above Ground Level	(Sopra il livello del mare)
APR	Aeromobile a Pilotaggio Remoto	
ARP	Aerodrome Reference Point	(Punto di riferimento di aerodromo)
ARPA	Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale	
ASL	Azienda Sanitaria Locale	
ATZ	Aerodrome Traffic Zone	(Zona di traffico aeroportuale)
BIM	Building Information Modeling	(Modello di informazioni edilizie)
CAD	Computer-Aided Design	(Progettazione assistita dall'elaboratore)
CGIL	Confederazione Generale Italiana del Lavoro	
CLS	Calcestruzzo	
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	(Conduttore complementare metallo-ossido)
CNN	Cable News Network	(Emittente televisiva)
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche	
CNVVF	Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco	
COTS	Commercial Off-the-Shelf	(Disponibile in commercio)
CPU	Central Processing Unit	(Microprocessore)
CSE	Coordinatore per la Sicurezza in fase di Esecuzione	
CSP	Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione	
DIRECT	Disaster RECOVERY Team	(Team studentesco)
DPI	Dispositivo di Protezione Individuale	
DSM	Digital Surface Model	(Modello Digitale della Superficie)
DTM	Digital Terrain Model	(Modello Digitale del Terreno)
DTS	Direttore Tecnico dei Soccorsi	
ENAC	Ente Nazionale Aviazione Civile	
EU	European Union	
EURO-STAT	Ufficio Statistico dell'Unione Europea	

Acronimo	Decodifica	Traduzione
FAA	Federal Aviation Administration	(Agenzia governativa Statunitense)
FAQ	Frequently Asked Questions	(Domande poste frequentemente)
FHD	Full High-Definition	(Standard ad alta risoluzione)
GB	Gigabyte	
GCP	Ground Control Point	(Punto di controllo a terra)
GIS	Geographic Information System	(Sistema informativo geografico)
GNSS	Global Navigation Satellite System	(Sistema satellitare globale di navigazione)
GPRS	General Packet Radio Service	(Tecnologia di telefonia mobile)
GPS	Global positioning system	(Sistema di posizionamento globale)
GSD	Ground Sample Distance	(Distanza misurata a terra tra due centri di pixel)
HD	High Definition	(Alta definizione)
HTML	HyperText Markup Language	(Linguaggio a marcatori per ipertesti)
IIR	Indice di Importanza relativa	
INAIL	Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro	
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing	(Associazione)
ISTAT	Istituto Nazionale Di Statistica	
ISTI	Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione	
IT	Information Technology	(Tecnologie dell'Informazione)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	(Amplificazione di luce attraverso emissione stimolata di radiazione)
LIDAR	Light Detection and Ranging o Laser	(Tecnologia)
MB	Megabyte	
MCS	Mercalli-Cancani-Sieberg	
MiBAC	Ministero dei Beni e delle Attività Culturali	
MM	Mercalli Modificata	
MP	MegaPixels	
MSK	Medvedev-Kàrnìk-Sponheuer	
MTOM	Max Take-Off Weight	(Peso massimo al decollo)
NASA	National Aeronautics and Space Administration	(Agenzia governativa Statunitense)

Acronimo	Decodifica	Traduzione
NAV-STAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging	(Tipologia di satellite)
NCP	Nucleo per il Coordinamento delle Opere Provvisionali	
NIS	Nucleo Interventi Speciali	
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	(Agenzia governativa Statunitense)
OSS	Osservatorio Sismico delle Strutture	
PC	Personal Computer	
PLE	Piattaforme di Lavoro mobili Elevabili	
POS	Piano Operativo di Sicurezza	
PSC	Piano di Sicurezza e Coordinamento	
RAM	Random Access Memory	(Memoria ad Accesso Casuale)
RAN	Rete Accelerometrica Nazionale	
RGB	Red Green Blue	
ROS	Responsabile Operativo del Soccorso	
RSPP	Responsabile del Servizio Prevenzione e Protezione	
RTK	Real Time Kinematics	(Tecnica)
SAF	Speleo Alpino Fluviale	
SAPR	Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto	
SD	Secure Digital	(Schede di memoria)
SFM	Structure From Motion	(Algoritmo)
STOP	Schede Tecniche delle Opere Provvisionali	
TAS	Topografia Applicata al Soccorso	
TLS	Terrestrial Laser Scanning	(Laser Scanning Terrestre)
UAS	Unmanned aircraft systems	(Sistema integrato aereo senza pilota.)
UAV	Unmanned aerial vehicle	(Aeromobile a pilotaggio remoto)
UE	European Union	
USA	United States of America	
USB	Universal Serial Bus	(Interfaccia standard)
VGA	Video Graphics Array	(Standar analogico)
VLOS	Visual Line Of Sight	(Linea di vista)
VRS	Virtuale Reference Station	(Stazione Virtuale di Riferimento)
VVF	Vigili del Fuoco	

Bibliografia

- Abderrahim, M., Garcia, E., Diez, R. & Balaguer, C., 2005. A mechatronics security system for the construction site. *Automation in Construction*, Volume 14, pp. 460-466.
- American Society of Photogrammetry, 1980. *Manual of Photogrammetry*, Asprs Pubns.
- Baiocchi, V., Dominici, D. & Mormile, M., 2013. UAV Application in Post-Seismic Environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Settembre 2013, Volume XL-1/W2, 2013, pp. 21-25.
- Banerjee, R., Kumar, D., Mohanty, K. K. & Nayak, S., 2009. Geomatics in Earthquake Mitigation. *Geospatial World*, 1 settembre 2009.
- Bansal, V. K., 2011. Application of geographic information systems in construction safety planning. *International Journal of Project Management*, Volume 29, pp. 66-77.
- Bansal, V. K., 2011. Use of GIS and Topology in the Identification and Resolution of Space Conflicts. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Marzo/Aprile 2011, pp. 159-171.
- Bansal, V. K., 2016. Potential Application Areas of GIS in Preconstruction Planning. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142(1).
- Bragadin, M., 2013. *Sicurezza nei cantieri post sisma e prevenzione cadute dall'alto*. Bologna,, pp. 1-14.
- Calantropio, A., Patrucco, G., Sammartano, G. & Teppati Losè, L., 2017. *Sensori low-Cost per il mapping speditivo di Beni Culturali in contesti di medio rischio: primi test sull'impiego di una COTS Steady Camera*. Ragusa.
- Caterpillar Inc., 2004. *Construction Vehicle and Equipment Blind Area Diagrams*, Peoria, Illinois.
- Cheng, M. Y. & O'Connor, J. T., 1996. ArcSite: Enhanced GIS for Construction Site Layout. *Journal Of Construction Engineering and Management*, Dicembre 1996, pp. 329-336.
- Cheng, T. & Teizer, J., 2014. Modeling Tower Crane Operator Visibility to Minimize the Risk of Limited Situational Awareness. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 3(28).

- Chiabrandò, F., Di Lolli, A., Patrucco, G., Spanò, A.T., Sammartano, G., Teppati Losè, L., 2017. Multitemporal 3D Modelling For Cultural Heritage Emergency During Seismic Events: Damage Assessment of S. Agostino Church in Amatrice (RI). *ISPRS*.
- Chi, S. & Caldas, C. H., 2012. Image-Based Safety Assessment: Automated Spatial Safety Risk Identification of Earthmoving and Surface Mining Activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, Marzo 2012, pp. 341-351.
- Costa, D. B., de Melo, R. R. S., Alvares, J. S. & Bello, A. A., 2016. *Evaluatin the Performance of Unmanned Aerial Vehicles for Safety Inspection*. Boston, MA, USA., pp. 23-32.
- Cuzzocrea, F. & Priori, F., 2014. Le tecniche topografiche applicate al soccorso. *GEOmedia*, Numero 3, pp. 10-14.
- Dai, F., Feng, Y. & Hough, R., 2014. Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications. *Visualization in Engineering*, 2(1).
- Dalla Mora, T., Peron, F., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Ruggeri, P., 2014. *Una Panoramica sul Building Information Modelling (BIM)*. Milano: AiCARR.
- De Luca, L., 2001. *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*. 2011 a cura di: Dario Flaccovio.
- DHL Trend Research, 2014. *Unmanned Aerial Vehicle in Logistics*, Troisdorf, Germany: DHL Customer Solutions & Innovation.
- Downes, L., 2009. *The Laws of Disruption: Harnessing the New Forces that Govern Life and Business in the Digital Age*. Basic Books.
- Gheisari, M. & Esmaeili, B., 2016. *Unmanned Aerial System (UAS) for Construction Safety Applications*. San Juan, Puerto Rico, ASCE (American Society of Civil Engineers), pp. 2642-2650.
- Gheisari, M., Irizarry, J. & Walker, B. N., 2014. *UAS4SAFETY: The Potential of Unmanned Aerial System for Construction Safety Applications*. Atlanta, GE, USA, ASCE (American Society of Civil Engineers), pp. 1801-1810.

- Gottfried, A., Di Giuda, G. M., Lanticina, M. & Villa, V., 2011. *Progettazione e gestione della sicurezza nei cantieri edili*. Milanofiori Assago (MI): Wolters Kluwer Italia S.r.l. (UTET).
- Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010. *Manuale. Opere provvisionali. L'intervento tecnico urgente in emergenza sismica..* Roma: Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - Ministero dell'Interno.
- Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010. *Vademecum STOP. Schede tecniche delle opere provvisionali per la messa in sicurezza post-sisma da parte dei Vigili del Fuoco*. Roma: Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - Ministero dell'Interno.
- Guariniello, R., 2016. *Il T.U. Sicurezza sul lavoro commentato con la giurisprudenza*. Milanofiori Assago (MI): Wolters Kluwer Italia S.r.l. (IPSOA).
- Hyeon-Jin, K. & Chan-Sik, P., 2013. Smartphone based real-time location tracking system for automatic risk alert in building project. *Applied Mechanics and Materials*, Volume 256-259, pp. 2794-2797.
- Irizarry, J., Gheisari, M. & Walker, B. N., 2012. Usability assessment of drone technology as safety inspection tools. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Volume 17, pp. 194-212.
- Kaufmann, J. E. & Kaufmann, H. W., 2006. *Fortress France: The Maginot Line and French Defenses in World War II*. Prima edizione a cura di: Stackpole Books.
- Kraus, K., 1998. *Fotogrammetria vol. 1 - Teoria e applicazioni*. 31 gennaio 1999 a cura di: Levrotto & Bella.
- Linder, W., 2016. *Digital Photogrammetry*. Düsseldorf: Springer.
- Mary, J. Y., Hohnadel, A. & Sicard, J., 2009. *Hommes et Ouvrages de la Ligne Maginot, Tome 5*. a cura di Paris: Histoire & Collections.
- Nex, F. & Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), pp. 1-15.
- Perri, S., 2017. *Il Duomo Vecchio di San Severino Marche; Elaborazione fotogrammetrica di immagini (Tesi di laurea in corso)*. Torino.
- Pradhananga, N. & Teizer, J., 2012. *Spatio-Temporal Safety Analysis of Construction Site Operations using GPS*. West Lafayette (Indiana), ASCE, pp. 787-796.

- Randall, T., 2011. Construction Engineering Requirements for Integrating Laser Scanning Technology and Building Information Modeling. *Journal of Construction*, 137(10), pp. 797-805.
- Sebt, M. H., Parvaresh Karan, E. & Delavar, M. R., 2008. Potential Application of GIS to Layout of Construction Temporary Facilities. *International Journal of Civil Engineering*, Dicembre 2008, 6(4), pp. 235-245.
- Sistema di sorveglianza degli infortuni mortali sul lavoro, 2017. *Le cadute dall'alto dei lavoratori*, Milano: Tipografia INAIL.
- Spanò, A. T. & Chiabrandò, F., 2016. *Fotogrammetria ed Image-matching*, Torino: Corso di Geomatica per la modellazione dell'Architettura.
- Spanò, A. T. & Chiabrandò, F., 2016. *Il laser scanner terrestre: TLS*, Torino: Corso di Geomatica per la modellazione dell'Architettura.
- Spanò, A. T. & Chiabrandò, F., 2016. *Tecniche di rilevamento satellitare: GPS e GNSS*, Torino: Corso di Geomatica per la modellazione dell'Architettura.
- Teizer, J., Allread, B. S. & Mantripragada, U., 2010. Automating the blind spot measurement of construction equipment. *Automation in Construction*, Volume 19, pp. 491-501.
- Volk, R., Stengel, J. & Schltmann, F., 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, Volume 38, pp. 109-127.
- Wang, J., Zhang, S. & Teizer, J., 2015. Geotechnical and safety protective equipment planning using range point cloud data and rule checking in building information modeling. *Automation in Construction*, Numero 49, pp. 250-261.
- Zhang, S., Teizer, J. & Pradhananga, N., 2015. *Global Positioning System Data to Model and Visualize Workspace Density in Construction Safety Planning*. Oulu (Finland).
- Zhou, W., Whyte, J. & Sacks, R., 2012. Construction safety and digital design: A review. *Automation in Construction*, Volume 22, pp. 102-111.

Sitografia

ARPA Piemonte, 2016. *Mappatura Amianto in Piemonte*. [Online]

Disponibile al link: http://webgis.arpa.piemonte.it/amianto_storymap_webapp/

[Consultato il giorno 01 Marzo 2017].

Calantropio, A., 2017. *Sicant by Alessio Calantropio @ PoliTo*. [Online]

Disponibile al link: <http://sicant.github.io>

[Consultato il giorno 23 Aprile 2017].

CGIL Pesaro, 2012. *UTSBasilicata - CGIL Pesaro Linee guida per la tutela della sicurezza e salute dei lavoratori a seguito di Evento Sismico*. [Online]

Disponibile al link:

http://www.utsbasilicata.it/index.php?option=com_content&view=article&id=1311:cgil-pesaro-linee-guida-per-la-tutela-della-sicurezza-e-salute-dei-lavoratori-a-seguito-di-evento-sismico&catid=499&Itemid=503

[Consultato il giorno 4 Aprile 2017].

Comitato per le Regole Tecniche sui Dati Territoriali delle Pubbliche Amministrazioni, 2009. *SITR - Sistema Ortoimmagini 1:10000 e Modelli altimetrici – Linee guida*. [Online]

Disponibile al link: http://www.sitr.regione.sicilia.it/wp-content/uploads/Documenti/Gara_ATA_2012/ortofoto_linee%20guida%20ortoimmagini%20e%20dtm.pdf

[Consultato il giorno 1 Luglio 2017].

Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd. *DJI Osmo - Specifications, FAQ, videos tutorials, manuals, DJI GO - DJI*. [Online]

Disponibile al link: <https://www.dji.com/osmo/info>

[Consultato il giorno 8 Giugno 2017].

Dipartimento dei Vigili del Fuoco, 2009. *Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco*. [Online]

Disponibile al link: <http://www.vigilfuoco.it>

[Consultato il giorno 10 Aprile 2017].

Dipartimento della Protezione Civile, 2015. *Dipartimento Protezione Civile*. [Online]

Disponibile al link: <http://www.protezionecivile.gov.it>

[Consultato il giorno 10 Aprile 2017].

ENAC, 2016. *Report Dichiarazioni Operatori APR*. [Online]

Disponibile al link:

http://moduliweb.enac.gov.it/applicazioni/SAPR/APR_ReportOperatori.asp?RIF_ENAC=6722&OPERATORE=

[Consultato il giorno 12 Marzo 2017].

Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, 2016. *Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto"*. [Online]

Disponibile al link:

https://www.enac.gov.it/repository/ContentManagement/information/N122671512/Regolamento_APR_ed2_em2.pdf

[Consultato il giorno 11 Marzo 2017].

EUROSTAT, 2016. *Health statistics introduced - Statistics Explained*. [Online]

Disponibile al link: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php>

[Consultato il giorno 17 Marzo 2017].

Federal Aviation Administration, 2016. *Summary of the Small UAS Rule*. [Online]

Disponibile al link: https://www.faa.gov/uas/media/Part_107_Summary.pdf

[Consultato il giorno 11 Marzo 2017].

Fly To Discover, 2016. *FTD300X*. [Online]

Disponibile al link: <http://flytodiscover.it/il-drone-300-grammi-ftd300x/>

[Consultato il giorno 13 Marzo 2017].

Identified Technologies, 2016. *Identified Technologies*. [Online]

Disponibile al link: <https://www.identifiedtech.com/>

[Consultato il giorno 02 Dicembre 2016].

INAIL, 2013. *Banca Dati Statistica Prevenzionale*. [Online]

Disponibile al link: <http://bancadaticsa.inail.it/>

[Consultato il giorno 17 Marzo 2017].

INGV, 2006. *Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale*. [Online]
Disponibile al link: http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/italia.html
[Consultato il giorno 03 Maggio 2017].

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 1971. *Carta Geologica d'Italia, Foglio 78*. [Online]
Disponibile al link: http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/tavoletta.php?foglio=78-79
[Consultato il giorno 13 Marzo 2017].

Ministero della Salute, 2014. *Piano nazionale prevenzione in edilizia 2014-2018*. [Online]
Disponibile al link: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_4.jsp?area=prevenzione
[Consultato il giorno 20 Marzo 2017].

Pix 4D SA, 2017. *Pix4D - Drone mapping software for desktop*. [Online]
Disponibile al link: <https://pix4d.com/>
[Consultato il giorno 11 Marzo 2017].

Servizio Sanitario Regionale Emilia-Romagna. *Ausl Modena*. [Online]
Disponibile al link:
<http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/f%252F8%252Fa%252FD.898600c503c2ce73f150/P/BLOB%3AID%3D5288/E/pdf>
[Consultato il giorno 4 Aprile 2017].

Sulankivi, K. *Building Information Modelling (BIM) promoting construction safety*. [Online]
Disponibile al link: https://www.tekes.fi/globalassets/global/ohjelmat-ja-palvelut/ohjelmat/turvallisuus/safety-and-security-ohjelmaraportti/safety-and-security-explore-the-topics/corporate-artikkelit/bim_vtt.pdf
[Consultato il giorno 26 Aprile 2017].

Treccani, 2012. *Dizionario di Economia e Finanza*. [Online]
Available at: <http://www.treccani.it/>
[Consultato il giorno 02 Dicembre 2016].

Visual Computing Laboratory - ISTI - CNR. *3DHOP*. [Online]
Disponibile al link: <http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/>
[Consultato il giorno 10 Marzo 2017].

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare i miei relatori, la Prof.ssa Nannina Spanò e il Prof. Filiberto Chiabrando, per il grande entusiasmo con il quale mi hanno sempre guidato in tutte le fasi di realizzazione di questo lavoro.

Un sentito ringraziamento va a tutti i membri del Team DIRECT, in particolare ai dottorandi Giulia Sammartano e Lorenzo Teppati Losè, per il supporto tecnico fornito durante le fasi di elaborazione e di raccolta dei dati.

Intendo rivolgere un doveroso ringraziamento al Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, specialmente agli ingegneri Ciro Bolognese, Marco Cavriani, Emanuele Gissi e Luca Ponticelli, che hanno seguito con interesse lo sviluppo della seconda parte di questa tesi.

Proseguo con gli impiegati dello SPreSAL dell'ASL di Torino che, durante il periodo in azienda, mi hanno sempre coinvolto in attività importanti per la mia formazione in termini di sicurezza sul lavoro.

Un ringraziamento particolare va ai miei amici e colleghi di corso: Carla, Francesco, Josephine, Julietta e Serena, per avermi sopportato e supportato a distanza con i loro preziosi consigli.

Voglio ancora ringraziare i miei cari amici: Alberto, Arianna, Guglielmo, Marcello e Marianna, senza i quali nei momenti di difficoltà il morale non sarebbe tornato ad alti livelli, e la mia amica Alice per i preziosi suggerimenti di traduzione.

Grazie anche ai miei compagni dell'Erasmus: Diego, Giulia e Luca, che hanno contribuito a rendere lieti i momenti trascorsi lontano da casa.

Un grazie sincero va a mio padre e mia madre, che mi hanno sempre sostenuto, dandomi la forza di non arrendermi nei periodi più grigi; senza di loro tutto questo non sarebbe stato possibile.

Infine, voglio dedicare questo giorno per me così speciale a mia sorella Nausicaa, con l'augurio che anche lei possa realizzare presto i suoi sogni.

