



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Curriculum in Ingegneria Civile, Ambientale, Edile e Architettura

Il dato di rilievo digitale per la conoscenza, valutazione e gestione del patrimonio storico costruito

*The digital survey data for the knowledge, evaluation and
management of the architectural heritage*

Ph.D. Dissertation of:
Ing. Alighiero Lucidi

Advisor:

Prof. Ramona Quattrini

Company Advisor:

Marco Falzetti

Curriculum supervisor:

Prof. Francesco Fatone

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Edile e Architettura
Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Italy

Indice

Abstract	iii
Indice delle Figure	iv
Indice delle Tabelle	viii
1. Introduzione	1
2. I sistemi di acquisizione per il rilievo	3
2.1. Tecniche range-based e image based	3
2.1.1. Laser scanning	5
2.1.2. Fotogrammetria	7
2.1.3. Il rilievo integrato	9
2.2. Interferometria	11
2.2.1. Principi base dell'interferometria terrestre	11
2.2.2. Criteri per la progettazione di un monitoraggio dinamico	14
2.3. Indagini geognostiche	18
2.3.1. Georadar	18
3. Il "sistema urbano"	22
3.1. Lo stato dell'arte e il panorama commerciale	23
3.2. Metodologia: implementazione di una piattaforma interattiva 3D	27
3.2.1. Fasi di sviluppo	27
3.2.2. La piattaforma: struttura e funzionalità	31
3.3. Casi studio	42
3.3.1. Ascoli Piceno	42
3.3.2. Venezia	56
4. Il "sistema edificio"	68

4.1. Analisi dello stato dell'arte dei sistemi di gestione dei dati alla scala dell'edificio	68
4.1.1. Point cloud, Building Information Modeling (BIM) e HBIM	68
4.1.2. Dalla nuvola di punti all'Analisi ad Elementi Finiti (FEA): stato dell'arte	71
4.1.3. L'analisi strutturale come validazione del metodo	76
4.2. Metodologia: lo sviluppo di una filiera affidabile dalla nuvola all'analisi strutturale	78
4.3. Casi studio	85
4.3.1. Campanile di San Ciriaco – Ancona (AN)	86
4.3.2. Torre del Borgo – Recanati (MC)	98
4.3.3. Torre di San Ciriaco – Ancona (AN) – Ottimizzazione processo	110
5. Conclusioni	128
5.1. Analisi critica delle metodologie sviluppate per il “sistema urbano” e per il “sistema edificio”	128
5.1.1. Il “Sistema urbano”	129
5.1.1. Il “Sistema edificio”	130
5.2. Sviluppi futuri e integrazione dei due sistemi	134
6. Bibliografia	136

Abstract

L'evoluzione degli strumenti e delle tecniche di rilievo del patrimonio storico costruito hanno ormai raggiunto livelli tecnologici tali da permettere l'acquisizione di un enorme volume di dati in un tempo sempre più limitato. Questo rapporto inversamente proporzionale tra capacità e tempo di acquisizione pone sempre più al centro della ricerca il tema della gestione del dato di rilievo.

In questa ottica il presente lavoro mira a offrire sistemi e processi in grado di ottimizzare la gestione, l'uso e l'analisi di una grande mole di dati nel campo dell'architettura storica.

Nel dettaglio la problematica è stata affrontata in due ambiti distinti: alla scala urbana e alla scala dell'edificio.

Alla scala urbana l'obiettivo è stato quello di implementare e migliorare un sistema di gestione esistente all'interno della azienda che ha ospitato il dottorato di ricerca. Attraverso casi studio su centri storici come Ascoli Piceno e Venezia, si sono ottimizzati strumenti, testandoli nell'ambito particolarmente sfidante della rappresentazione dell'architettura storica.

In merito alla scala dell'edificio la ricerca ha indagato la possibilità di utilizzare la nuvola di punti ai fini dell'analisi strutturale ad elementi finiti, attraverso la generazione di un processo semi-automatico che consenta di sfruttare la nuvola di punti per la generazione del modello strutturale. I casi studio, su cui la metodologia è stata studiata, si sono concentrati sulla tipologia delle torri storiche in muratura.

In entrambi gli ambiti di ricerca affrontati, le soluzioni proposte sono state validate: nell'ambito urbano la piattaforma è stata testata dall'uso della stessa in ambiente professionale; mentre nell'ambito dell'edificio è stato condotto un confronto tra i risultati forniti dal modello strutturale, ottenuto attraverso la metodologia proposta, e i dati sperimentali registrati in campo.

Indice delle Figure

Figura 1 – Pipeline delle tecniche range-based e image-based a confronto.....	4
Figura 2 – Esempio di sistema radar interferometrico terrestre.....	12
Figura 3 – Principio interferometrico per il calcolo degli spostamenti (d = spostamento misurato; λ = lunghezza d' onda emessa; φ = misura della fase grezza per ogni acquisizione)	12
Figura 4 – Schema rappresentativo delle modalità di acquisizione di un sistema TInRAR. 13	
Figura 5 – Schema rappresentativo di alcune geometrie di monitoraggio TInRAR per diverse tipologie di strutture: a) torri; b) ponti	14
Figura 6 – Esempio di geometria di monitoraggio dinamico di una struttura a prevalente sviluppo verticale con tecnica TInRAR.....	15
Figura 7 – Schema esemplificativo della misura degli spostamenti lungo la linea di vista strumentale (LOS) e scomposizione vettoriale per ricavare lo spostamento orizzontale	16
Figura 8 – Esempio di sezione elettromagnetica.....	19
Figura 9 – Modalità di acquisizione GPR con generazione di un'iperbole di diffrazione in presenza di un target sepolto.....	20
Figura 10 – Piattaforma IQ: layout a tre sezioni.....	29
Figura 11 – Ascoli Piceno. Strumenti utilizzati nelle acquisizioni del centro storico della città	43
Figura 12 – Ascoli Piceno. Percorso di rilievo del sistema integrato Pegasus Two + Stream EM	43
Figura 13 – Piattaforma: layout	45
Figura 14 – Piattaforma / Pannello sezioni	46
Figura 15 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna.....	46
Figura 16 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista esterna	47
Figura 17 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna: slice verticale	48
Figura 18 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna: slice orizzontale	48
Figura 19 – Slice orizzontale con vista orientata sul piano del box della sezione	49
Figura 20 - Piattaforma / Pannello Misurazioni / Distanza	50
Figura 21 – Piattaforma / Pannello Misurazioni / Area	50
Figura 22 – Piattaforma / Pannello Misurazioni / Angolo	51

Figura 23 – Tool lesioni: schermata di input	53
Figura 24 – Tool lesioni: schermata di output	53
Figura 25 – Tool lesioni: riconoscimento tra lesioni ante-post.....	55
Figura 26 – Venezia. Strumentazione usata per il rilievo installata sull'imbarcazione	56
Figura 27 – Venezia. Tracciato percorso dall'imbarcazione con strumentazione MMS e Multibeam	58
Figura 28 – Piattaforma: layout aggiornato	60
Figura 29 – Piattaforma / Pannello Disegno.....	61
Figura 30 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo	62
Figura 31 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo: scelta dei punti sulla nuvola	62
Figura 32 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo / Strumento Polilinea	63
Figura 33 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo applicato ad un prospetto ..	64
Figura 34 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo / Strumento Polilinea	65
Figura 35 – Piattaforma / Pannello Importa-Esporta	65
Figura 36 – Ortofoto del prospetto ottenuto dal rilievo fotogrammetrico.....	66
Figura 37 – Prospetto: Elaborato tradizionale	66
Figura 38 – Classificazione dei metodi per la generazione di modelli strutturali	73
Figura 39 – Nuvola di punti (a sinistra) e mesh 2D (a destra).....	79
Figura 40 – Esempio di Mesh 3D con i tetraedri che la costituiscono	80
Figura 41 – Workflow sintetico delle fasi del processo di generazione di un FEM dalla nuvola di punti.....	81
Figura 42 – (Barsanti and Guidi, 2018) Cavallo Buontalenti nella Galleria degli Uffizi. A sinistra il modello a mesh triangolari ottenuto dopo una semplice decimazione, a destra il modello retopologizzato. La mesh triangolare originale contava oltre un milione di poligoni, quella retopologizzata ne conta 35mila	83
Figura 43 – Vista del Colle Guasco dal Porto di Ancona.....	86
Figura 44 – Posizioni delle scansioni esterne al Campanile di San Ciriaco	88
Figura 45 – Posizioni delle scansioni interne al Campanile di San Ciriaco	89
Figura 46 -Workflow per la generazione di un modello FEM a partire dalla nuvola di punti	90
Figura 47 - Constraint List con elenco stazioni e relativo errore di allineamento	91

Figura 48 – Nuvola di punti del Campanile di San Ciriaco	91
Figura 49 - Evoluzione della mesh all'interno del software Geomagic ©: a) Mesh con bordi rossi che non verranno modificati durante le operazioni di editing della mesh; b) mesh decimata di 100 000 triangoli; c) Mesh con triangoli dalla forma e dimensioni regolari; d) Mesh finale (62684 triangoli)	93
Figura 50 – Riepilogo delle operazioni in Geomagic©	94
Figura 51 – Mesh 3D generate dal software Midas FEA©	95
Figura 52 – Forme modali di vibrazioni principali con relative masse partecipanti.....	96
Figura 53 – Foto panoramica di Piazza Giacomo Leopardi. Sulla sinistra la Torre del Borgo, sulla destra il Palazzo Comunale	98
Figura 54 – Torre del Borgo - Scansioni esterne	100
Figura 55 – Torre del Borgo – Scansioni interne	100
Figura 56 -Torre del Borgo – Nuvola di punti complete di Piazza Giacomo Leopardi.....	101
Figura 57 – Torre del Borgo – Nuvola isolate importata in Geomagic© Wrap	102
Figura 58 – Torre del Borgo – Nuvola pulita da tutti gli elementi non strutturali.....	103
Figura 59 – Torre del Borgo – Generazione della mesh.....	103
Figura 60 – Torre del Borgo – Pre e post chiusura dei buchi della mesh.....	104
Figura 61 – Torre del Borgo – Mesh decimata	105
Figura 62 – Torre del Borgo – Mesh prima (a sinistra) e dopo (a destra) del comando “Ricrea mesh”	106
Figura 63 – Torre del Borgo – Mesh prima (a sinistra) e dopo (a destra) del comando “Ripara mesh”	106
Figura 64 – Torre del Borgo – Modello segmentato in Autodesk Inventor©	108
Figura 65 – Torre del Borgo - Modello correttamente importato in Midas FEA	108
Figura 66 – Torre del Borgo – Workflow implementato	109
Figura 67 – Campanile di San Ciriaco – Posizione e orientamento delle camere	111
Figura 68 – Campanile di San Ciriaco – Radar interferometrico nella fase di acquisizione	111
Figura 69 – Campanile di San Ciriaco – Posizione del radar nelle due acquisizioni	112
Figura 70 – Campanile di San Ciriaco – Individuazione dei picchi di riflettanza individuati dall’IBIS	113

Figura 71 – Campanile di San Ciriaco – Diagramma degli spostamenti sull’asse orizzontale del range bin prescelto al trascorre del tempo	114
Figura 72 – Campanile di San Ciriaco – Spettro ottenuto dalla trasformata di Fourier	114
Figura 73 – Campanile di San Ciriaco – Markers sulla nuvola di punti della cupola	116
Figura 74 – Campanile di San Ciriaco – Nuvola di punti completa (TLS più fotogrammetria)	116
Figura 75 – Campanile di San Ciriaco – Mesh stagna	117
Figura 76 – Campanile di San Ciriaco – Retopology: Linee di tendenza	118
Figura 77 – Campanile di San Ciriaco – Zbrush©: comando Zremesher applicato alla mesh	119
Figura 78 – Campanile di San Ciriaco: suddivisione del modello all’interno di Rhinoceros©	120
Figura 79 – Campanile di San Ciriaco – Modello discretizzato in Midas FEA NX	121
Figura 80 – Campanile di San Ciriaco - Il layout degli accelerometri per ogni setup di misura	122
Figura 81 – Campanile di san Ciriaco – Forme modali registrate sperimentalmente	123
Figura 82 – Campanile di San Ciriaco – Materiali assegnati (prima prova)	124
Figura 83 – Campanile di San Ciriaco - Forme modali del modello numerico di partenza	125
Figura 84 – Campanile di San Ciriaco – Materiali assegnati (modello finale)	126
Figura 85 – Campanile di San Ciriaco - Forme numeriche modali ottenute con analisi degli autovalori effettuata sul modello aggiornato all'ultimo step	127
Figura 86 – Campanile di San Ciriaco. Workflow ottimizzato	131
Figura 87 – Campanile di San Ciriaco - Istogramma di deviazione nuvola di punti - modello solido espresso in metri	132
Figura 88 – Campanile di San Ciriaco – Mappa di deviazione nuvola di punti - modello solido espresso in metri	132

Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Confronto tra le frequenze dei due modelli FEM con i risultati sperimentali derivati dall' OMA	97
Tabella 2 – Torre del Borgo - Scansioni e numero di punti per ciascuna di essa	101
Tabella 3 – Campanile di San Ciriaco – Parametri dinamici sperimentali ottenuti con OMA	123
Tabella 4 – Campanile di San Ciriaco - Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico di partenza	125
Tabella 5 – Campanile di San Ciriaco - Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico aggiornato al secondo step.....	125
Tabella 6 – Campanile di San Ciriaco – Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico aggiornato all'ultima fase.....	126

1. Introduzione

Nell'ultimo ventennio, nel campo del rilievo dell'architettura si è verificato un esponenziale progresso nel campo delle tecnologie, degli strumenti e delle tecniche di rilievo: si è assistito in poco tempo alla nascita, crescita ed evoluzione di strumenti che hanno rivoluzionato il modo di rappresentare la realtà. Oggi, l'uso di laser scanner 3D, al pari della fotogrammetria, rappresenta ormai una procedura standardizzata e diffusa per il rilievo dell'esistente.

Tali nuovi strumenti hanno generato nuovi prodotti del rilievo: per secoli l'elaborato grafico bidimensionale rappresentava il fine ultimo, il catalizzatore dei dati raccolti nelle campagne di rilievo, oggi non più. Parallelamente all'evoluzione della gamma degli strumenti si sono generati nuovi output del rilievo stesso, primo fra tutti la nuvola di punti.

L'attuale stato dell'arte sulle tecniche di acquisizione di dati per il rilievo permette di poter acquisire una mole così elevata di dati in un così piccolo intervallo di tempo che, necessariamente e prepotentemente, entra in gioco il tema del controllo stesso di questi dati. Il controllo inteso come capacità di gestione, analisi, uso e fruizione del dato rilevato. Con le attuali capacità di acquisizione dei dati si corre il rischio di essere in possesso di una quantità di informazioni enorme, ma allo stesso tempo di non essere in grado di gestirla in maniera efficiente ed efficace, sia dal punto di vista software che da quello hardware.

In questo contesto l'obiettivo generale della tesi è sviluppare e testare metodi efficienti di gestione dei dati di rilievo, con particolare riguardo alle necessità indicate dalle caratteristiche intrinseche dell'architettura storica. Considerando inoltre che il patrimonio e l'architettura di valore raramente possono essere trattati in maniera isolata dal loro contesto, molto spesso complesso.

A questo obiettivo generale corrispondono quindi due obiettivi specifici perseguiti nell'ambito della presente ricerca: un primo obiettivo più strettamente legato alla gestione dei dati riguarda quello che sarà definito "sistema urbano", mentre l'altro obiettivo si interfacerà con il "sistema edificio".

Il lavoro condotto nell'ambito urbano ha preso le mosse da una piattaforma già esistente all'interno dell'azienda in cui è stato svolto il dottorato di ricerca. Questo strumento, in modo parziale, rispondeva già alle esigenze di integrazione, gestione e fruizione di una grande mole di dati provenienti dal rilievo. Nello specifico il fine che la ricerca si è posto è stato quello di

Introduzione

una specializzazione della piattaforma nel perimetro dell'architettura storica, con particolare attenzione al tema della rappresentazione del rilievo.

Il secondo obiettivo riferito alla scala dell'edificio, invece, propone un approccio interdisciplinare che cerca di massimizzare la relazione tra rilievo e analisi strutturale.

In questa direzione la ricerca, attraverso i casi studio affrontati, ha mirato alla generazione di un processo di lavoro semi-automatico che consenta lo sfruttamento della nuvola di punti ai fini dell'analisi strutturale nell'ambiente della modellazione ad elementi finiti.

Dal punto di vista metodologico, a valle dello stato dell'arte, la ricerca si è articolata quindi in due filoni, poi comparati e ragguagliati per tratteggiare ulteriori prospettive di ricerca. Quindi la presente tesi è stata strutturata in cinque capitoli.

Il Capitolo 1 è costituito dall'Introduzione.

Nel Capitolo 2 viene illustrato lo stato dell'arte sui sistemi di acquisizione per il rilievo passando in rassegna le tecniche range-based, le tecniche image-based fino a l'interferometria, con alcuni cenni infine sulla geognostica.

Nei capitoli seguenti viene affrontato invece il tema centrale della gestione del dato che viene declinato a due diverse scale: quella urbana e quella dell'edificio.

Quindi il capitolo 3 è dedicato alla sfida della gestione di dati che rappresentano una città o comunque parte di essa, partendo dall'analisi di sistemi di gestione esistenti fino a proporre uno che integri dati provenienti da diverse fonti di acquisizioni.

Nel capitolo 4 ci si è concentrati sui sistemi informativi destinati alla gestione del singolo edificio. Contrariamente alla scala urbana, di cui al capitolo sopra, in questo ambito vi sono già sistemi in grado di gestire e arricchire il dato acquisito come ad esempio il BIM e l'HBIM. Per questi motivi si è approfondito un aspetto in particolare che, allo stato dell'arte attuale, è in piena evoluzione ma risulta ancora non compiutamente indagato: l'uso diretto del dato proveniente dal rilievo per l'analisi strutturale ad elementi finiti.

Nel capitolo 5 infine si analizzano i risultati ottenuti dalle metodologie proposte e applicate in una visione d'insieme, tracciando le linee per lo sviluppo futuro e l'avanzamento della ricerca sui temi della conoscenza, valutazione e gestione del patrimonio storico costruito.

2. I sistemi di acquisizione per il rilievo

La necessità di dover trovare nuovi paradigmi di gestione, visualizzazione e fruizione dei dati acquisiti tramite il rilievo è diretta conseguenza dell'enorme mole di dati, ricchi e significativi, che gli attuali strumenti di acquisizione sono oggi in grado di fornire agli utenti e ai professionisti.

Prima di passare alla descrizione di alcune possibili soluzioni riguardo al tema centrale della gestione dei dati si vuole offrire, in questo capitolo, una panoramica dei sistemi di acquisizione con particolare attenzione a quelli direttamente usati nei casi studio trattati.

2.1. Tecniche range-based e image based

Le tecniche di acquisizione geometrica possono dividersi in due grandi famiglie: tecniche range-based (laser scanning) e tecniche image-based (fotogrammetria o fotomodellazione). La trattazione del capitolo seguirà tale divisione.

Le differenze tra i sistemi a sensore attivo (range-based) e quelli a sensore passivo (image-based) sono principalmente riassumibili nelle seguenti tre:

- I sistemi range-based hanno come risultato diretto dell'acquisizione la nuvola di punti, mentre le tecniche image-based richiedono immagini bidimensionali che possono generare una nuvola di punti tridimensionale sfruttando tecniche di visione e principi fotogrammetrici;
- La nuvola di punti generata da sistemi range-based è un modello metricamente corretto e coerente con la realtà; quella generata dalla fotogrammetria necessita di essere scalata utilizzando almeno una misura nota;
- L'errore di misurazione dei modelli derivati da tecniche range-based è noto poiché dipende esclusivamente degli strumenti di acquisizione. Nei modelli derivati da tecniche image-based, invece, l'errore è dato dal contributo di più fattori quali, ad esempio, la distanza di presa, le caratteristiche della fotocamera e gli algoritmi utilizzati per la generazione della nuvola dalle immagini 2D.

La Figura 1 schematizza i processi necessari per ottenere un modello 3D texturizzato a partire dalle due diverse tecniche.

I sistemi di acquisizione per il rilievo

pipeline tecniche range-based vs image-based

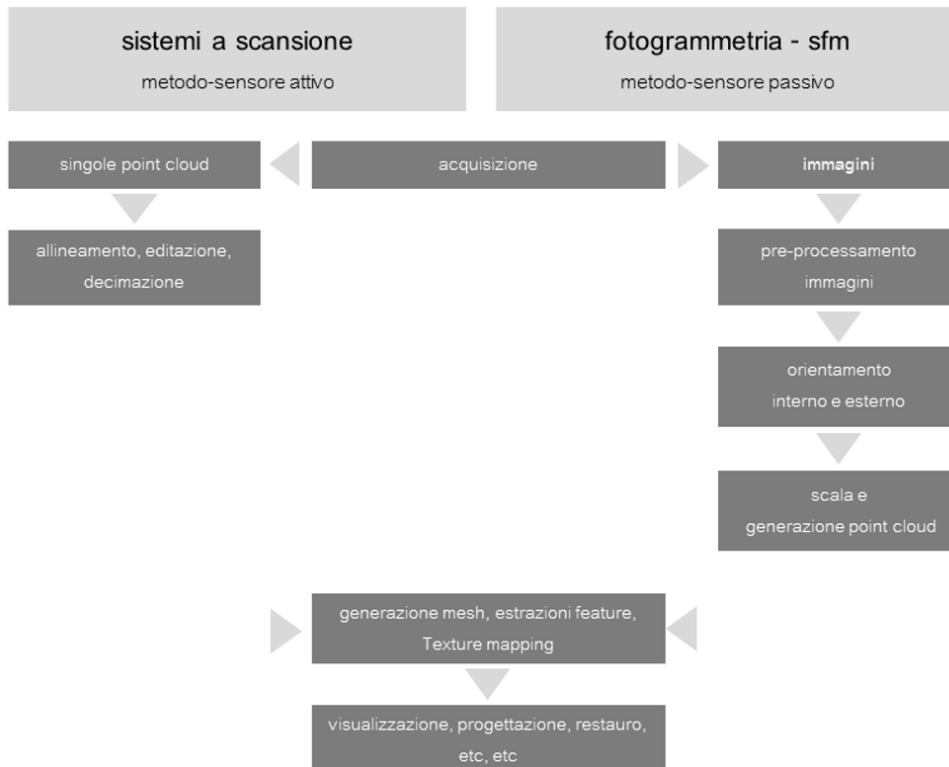


Figura 1 – Pipeline delle tecniche range-based e image-based a confronto

2.1.1. Laser scanning

Gli strumenti a scansione (range-based) sono dispositivi in grado di emettere impulsi laser in rapidissima sequenza e di rilevare la morfologia di un oggetto registrando una serie di punti di coordinate note. Il raggio laser viaggia parallelo e costante (o con valori di divergenza molto bassi) nel suo percorso fino ad incontrare una superficie che lo intercetta e lo riflette, così da farlo ritornare al ricevitore dello scanner che è in grado di coglierne una serie di informazioni.

Questi strumenti definiti scanner laser sono in grado quindi di raccogliere milioni di informazioni in tempi brevissimi. Questa possibilità ha praticamente ribaltato la classica metodologia di rilievo in cui il tempo necessario alla fase di rilievo in campagna era predominante rispetto alla restituzione dell'elaborato finale del rilievo.

Parallelamente nel rilievo classico il topografo operava un'interpretazione e discretizzazione delle informazioni da raccogliere a monte della fase operativa del rilievo mentre con il rilievo realizzato tramite laser scanner il processo di rilevamento è automatizzato e si possono acquisire milioni di punti nello spazio a scapito dell'aspetto critico della discretizzazione, che avverrà quindi nella fase successiva di elaborazione dei dati acquisiti (Bianchini et al., 2015) (Battini, 2012)

Le soluzioni tecnologiche, messe a disposizione oggi, offrono occasioni di grande interesse per il rilievo nel settore dei beni culturali, sia per quanto riguarda il tempo della fase di acquisizione dei dati metrici (elemento oramai discriminante e di primaria importanza), sia per quanto riguarda la rappresentazione per oggetti di interesse archeologico, artistico, architettonico.

Un artefatto architettonico è un insieme di componenti tridimensionali che definiscono spazialmente una forma e un'idea di progetto: la rappresentazione dell'architettura può non utilizzare semplicemente mezzi grafici bidimensionali per descriverla e descriverla in tutte le sue parti, ma necessita di sistemi che prevedano la possibilità di analizzare da più punti di vista le forme che lo compongono (Battini, 2015) (Mohamed et al., 2019).

Nel campo del patrimonio storico architettonico è ormai imprescindibile un rilievo di dettaglio ottenuto da strumenti laser scanner, che permetta di ottenere una copia digitale degli edifici esistenti con un'elevata precisione metrica. Numerosi sono gli studi e gli esempi che partendo da un rilievo con tecniche range-based mirano ad una conservazione ed alla

I sistemi di acquisizione per il rilievo

manutenzione di edifici appartenenti al Cultural Heritage. (Bernat et al., 2014; Böttger et al., 2016; Pritchard et al., 2017).

Nell'ottica della conservazione degli edifici storici l'uso del laser scanner è stato applicato sempre più negli ultimi venti anni nello studio del degrado sia dal punto di vista materico che delle deformazioni (Armesto-González et al., 2010; Pesci et al., 2013, 2011).

L'ambito dell'architettura storica e la conseguente necessità di rilevare con precisione dettagli e volumi spesso complessi, in una prima fase, facevano propendere la scelta della tipologia dello strumento verso laser scanner tradizionali di tipo fisso. Negli ultimi anni, invece, complice l'evoluzione tecnologica degli strumenti hardware e software, i sistemi di scansione mobili hanno iniziato ad acquisire una propria valenza anche nel campo del rilievo di manufatti di valenza storico artistica.

Tra questa categoria di laser mobili, i laser indossabili (wearable laser) risultano particolarmente flessibili ed idonei alle operazioni di rilevamento in ambienti impegnativi quali cave, grotte, terreni sconnessi, cunicoli, tunnel e ovunque non sia possibile o proficuo stazionare con strumentazione tradizionale. La combinazione di sensori per il posizionamento, sistemi inerziali, fotocamere e profilometri laser permette la ricostruzione tridimensionale dell'ambiente circostante in qualsiasi situazione. Diversi studi hanno testato questa tipologia di strumenti, ponendola a confronto con sistemi laser scanner tradizionali, evidenziando una riduzione della nitidezza del dato ottenuto a fronte del notevole guadagno in termini di agibilità e tempo di acquisizione. (Bronzino et al., 2019; Castagnetti et al., 2016; Fassi and Perfetti, 2019; Masiero et al., 2018; Nespeca, 2019)

Ampliando il campo di azione del rilievo di tipo "mobile mapping" ad aree che vanno oltre l'estensione dell'edificio, come ad esempio intere porzioni di città o tratti di infrastrutture viarie, è consolidato l'uso di sistemi integrati che integrano ai sistemi tradizionali, basati su laser scanner, sistemi globali di navigazione satellitare (GNSS). L'uso di tale tecnologia permette l'acquisizione attraverso uno strumento montato su un veicolo, che durante la fase di acquisizione può raggiungere velocità di fino all'ordine di qualche decina di chilometri orari. Nelle sue applicazioni è possibile abbattere tempi i tempi di acquisizione in campagna: a parità di estensione del rilievo, l'uso di tecnologie laser scanner del tipo statico sarebbero proibitive (El-Sheimy and Lari, 2020; Gambardella et al., 2016; Puente et al., 2013).

2.1.2. Fotogrammetria

Seppure la nuvola di punti rappresenti il risultato finale per entrambi i processi c'è una sostanziale differenza tra i sistemi laser scanner e la tecnica fotogrammetrica. La distinzione è già nella loro definizione: i sistemi laser scanner sono strumenti, la fotogrammetria è una tecnica; i laser scanner acquisiscono nuvole di punti, la fotogrammetria ottiene nuvole di punti come risultato derivato.

Quindi si può riassumere che la fotogrammetria è la tecnica attraverso cui, da immagini bidimensionali di un oggetto reale, si riesce ad ottenere un suo modello tridimensionale.

I fondamenti e le basi teoriche della fotogrammetria sono riscontrabili fin dai primi anni del XX secolo, tuttavia solo quando la fotografia digitale è stata perfezionata e i personal computer hanno subito un notevole incremento nella loro potenza di elaborazione c'è stato un cambiamento significativo nelle applicazioni, che sono poi diventate popolari e diffuse.

Questi miglioramenti puramente tecnologici - algoritmi di calcolo e fotografia digitale - hanno permesso di sfruttare appieno i fondamenti scientifici, geometrici, proiettivi e analitici già insiti nel metodo, che di fatto sono rimasti praticamente invariati.

Nel passaggio al regno digitale, i principali principi geometrici/di proiezione e analitici che costituiscono la base della fotogrammetria rimangono sostanzialmente invariati.

In genere, per ottenere una rappresentazione tridimensionale di un oggetto, è ancora necessario stabilire una relazione spaziale tra i punti dell'oggetto, i punti rappresentati sul sensore/pellicola e le posizioni e le inclinazioni rispetto ai centri di proiezione ed assi ottici dell'attrezzatura fotografica.

La combinazione di suddette operazioni, denominate "orientamenti", ha lo scopo di identificare, quando conosciuti, i parametri intrinseci e parametri estrinseci che caratterizzano il modello fotogrammetrico (Carpiceci, 2012) (Paris, 2012).

Infatti, seppur con alcune differenze, i sistemi di fotogrammetria digitale e i software fanno sostanziale riferimento a principi teorici comuni, per questo possono essere definiti "classici". Utilizzano, in particolare, sia le equazioni di collinearità, che consentono di descrivere analiticamente il sistema di fotogrammetria con variabili note e sconosciute, sia la geometria epipolare, con la quale è possibile ridurre lo spazio in cui si ricercano le corrispondenze tra punti omologhi.

Esistono due gruppi principali di applicazioni a seconda che sia richiesto o meno l'intervento di un operatore.

I sistemi di acquisizione per il rilievo

Il primo gruppo comprende i cosiddetti software di foto modellazione in cui l'operatore ha il compito di identificare i punti omologhi per l'orientamento, nonché i punti caratteristici su cui basare la modellazione geometrica e testurizzata elaborata dal software stesso (De Luca, 2009).

Il secondo gruppo comprende la tecnica della Structure from Motion (SfM) (sviluppatasi più recentemente rispetto alle applicazioni del primo gruppo) in cui l'elaborazione di diversi algoritmi ad hoc ha portato all'automazione di diverse fasi (Remondino et al., 2012) (Sicuranza, 2013).

La Structure from Motion (SfM) consente di orientare automaticamente un set di immagini e di generare in forma automatica una nuvola di punti densa dell' oggetto rilevato.

La diffusione e l' affermazione di tale tecnica è dovuta principalmente a due concause: da un lato, lo sviluppo di algoritmi di estrazione e triangolazione di immagini che hanno portato a un aumento della qualità dei dati ottenibili da una coppia di immagini stereo e, dall' altro, il miglioramento della qualità di fotocamere digitali (a fronte della riduzione del loro costo) e dei metodi di calibrazione delle stesse, che hanno portato all' utilizzo della modellazione fotogrammetrica un pubblico sempre più ampio (Angheluta, 2019; Clini et al., 2016a, 2016b; Evgenikou and Georgopoulos, 2015; Nespeca et al., 2017; Pamart et al., 2019; Remondino and Menna, 2008; Westoby et al., 2012).

I recenti progressi nei software fotogrammetrici multi-immagine hanno portato a flussi di lavoro altamente automatizzati e ridotto in modo significativo il carico di conoscenze tecniche necessarie per produrre risultati accettabili. Sebbene la maggior parte delle indagini di fotogrammetria multi-immagine sia ancora intrapresa in un contesto accademico, la tecnica è sempre più utilizzata da una percentuale molto più ampia di professionisti del patrimonio come testimonia (McCarthy, 2014).

Nel campo della ricerca, invece, numerosi e consolidati sono gli studi e le applicazioni che usano la fotogrammetria nell'ambito del Cultural Heritage.

Uno dei principali vantaggi di questo metodo è il suo essere contact-less e non invasivo, in grado di fornire misurazioni di alta precisione con costi molto più contenuti rispetto a tecniche laser scanning. Il suo uso nel campo del patrimonio degli edifici storici spazia dal rilievo del dettaglio architettonico, passando per la restituzione di interi fronti stradali, fino ad arrivare alla generazione di interi modelli tridimensionali utili ad applicazione di realtà virtuale (VR) e/o aumentata (AR). Allo stesso modo vengono restituiti spazi aperti connessi

agli edifici come cortili o intere piazze (Amoruso and Bartolomei, 2010; Angheluta, 2018; Attenni et al., 2018; Ippolito et al., 2013; Kingsland, 2020; Markova and Kravchenko, 2018; Morganti and Bartolomei, 2018; Rami, 2012).

2.1.3. Il rilievo integrato

Nei paragrafi precedenti sono stati evidenziate le potenzialità e l'uso delle tecniche range based ed image based nel rilievo del patrimonio storico culturale trattandole singolarmente. Ciò che avviene, però, ad oggi nella maggior parte dei casi è che le due tecniche siano usate contemporaneamente e in maniera integrata.

L'integrazione tra la scansione laser terrestre e la fotogrammetria digitale rappresenta la soluzione più vantaggiosa poiché consente di trarre i benefici di entrambe le tecniche, garantendo un maggior livello di qualità e di dettaglio del dato ottenuto (Guarnieri et al., 2006; Siebke et al., 2018; Yastikli, 2007).

In particolar modo per la rappresentazione di modelli 3D fotorealistici la tecnologia di scansione laser potrebbe essere vista come un complemento alla fotogrammetria a distanza ravvicinata CRP (Close Range Photogrammetry). Ad esempio, gli scanner laser terrestri (TLS) hanno la capacità di raccogliere rapidamente informazioni sulla superficie 3D ad alta risoluzione di un oggetto. Lo stesso tipo di dati potrebbe essere generato utilizzando tecniche di fotogrammetria a distanza ravvicinata (CRP), ma le disparità di immagini comuni alle scene a distanza ravvicinata rendono questo compito impegnativo per l'operatore. I sistemi di imaging di alcuni TLS non hanno una risoluzione radiometrica molto elevata, mentre le fotocamere digitali ad alta risoluzione utilizzate nella moderna CRP lo fanno. Infine, i TLS sono essenzialmente legati alla Terra mentre le telecamere possono essere spostate a piacimento attorno all'oggetto da riprendere (Bocheńska et al., 2019; Forkuo and King, 2004).

Un altro aspetto particolarmente premiante è la possibilità di integrare fotocamere a aeromobili a pilotaggio remoto UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

La fotogrammetria UAV ha un tasso di acquisizione dati planare più elevato nelle zone non facilmente raggiungibili, come ad esempio il tetto di un edificio, rispetto alla scansione laser terrestre.

Documentare la forma di interi edifici, comprensivi del manto di copertura, esclusivamente attraverso la scansione laser terrestre è piuttosto difficile. In particolare, acquisire dati in posizioni in cui lo scanner non è posizionabile risulta proibitivo.

I sistemi di acquisizione per il rilievo

Una possibile soluzione potrebbe essere collocare lo scanner laser terrestre fisso a distanza, sfruttando la presenza di edifici più alti o zone del terreno sopraelevate rispetto all'oggetto da rilevare. Ma, ammesso che queste possibilità siano perseguibili, i dati così acquisiti avrebbero una bassa densità di punti a causa del campo visivo ristretto e della distanza. La mobilità garantita dalla fotogrammetria UAV riesce a sopperire a questi svantaggi, risultando quindi necessaria al fine di avere un rilievo completo e sufficientemente ricco.

L'integrazione della fotogrammetria da drone, inoltre, risulta particolarmente utile e trova sempre più estesa applicazione nel campo dell'archeologia (Chiarini et al., 2014; Federman et al., 2018; Jo and Hong, 2019; Kersten et al., 2015; Manajitprasert et al., 2019).

2.2. Interferometria

Nel campo delle strutture e delle infrastrutture, nell'ultimo decennio, si è assistito ad un crescente sviluppo di soluzioni tecniche innovative di metodi osservazionali per la caratterizzazione esaustiva e speditiva delle proprietà dinamiche delle strutture e per il monitoraggio periodico dello stato di conservazione delle stesse, noto nella letteratura scientifica come "Structural Health Monitoring" (SHM) (Balageas et al., 2010).

Tra le tecniche di telerilevamento più efficaci per lo SHM si colloca l'Interferometria Radar Terrestre (Bongiovanni et al., 2015; Brunetti and Mazzanti, 2015), la cui efficacia, relativamente agli ambiti citati, è oggi pienamente comprovata. Grazie agli evidenti vantaggi offerti da tale tecnica (come la rapidità di installazione della strumentazione e di acquisizione dei dati e l'elevata risoluzione spaziale e temporale di campionamento), questa viene sempre più frequentemente impiegata soprattutto per la valutazione speditiva di alcune caratteristiche strutturali (come le frequenze proprie di vibrazione, le forme modali e le ampiezze di oscillazione, i fattori di smorzamento, ecc.) di ponti, viadotti, edifici ed altre tipologie di strutture civili ed industriali, fornendo risultati del tutto paragonabili a quelli ottenuti attraverso altre tecniche convenzionali di monitoraggio "da contatto" come, ad esempio, reti di sensori velocimetrici e/o accelerometrici installati sulle strutture (Atzeni et al., 2010; Gentile and Bernardini, 2010; Mazzanti et al., 2014; Pieraccini et al., 2008).

Tali caratteristiche rendono la tecnica idonea per rapide ricognizioni dei principali parametri strutturali, anche in condizioni di emergenza, abbattendo i costi legati alle onerose fasi progettuali e di installazione tipiche di altre tecniche convenzionali a contatto.

2.2.1. Principi base dell'interferometria terrestre

L'Interferometria Radar Terrestre (TInRAR) è una tecnica di telerilevamento attraverso la quale è possibile misurare simultaneamente gli spostamenti di numerosi punti di edifici, strutture o altri elementi antropici e naturali, con elevate frequenze di campionamento del dato, consentendo di eseguire contestualmente sia analisi statiche che dinamiche (misura delle vibrazioni).

Tale misura viene eseguita completamente in remoto, ovvero senza l'installazione di altri sensori o riflettori a contatto con la struttura, sfruttando pertanto la naturale riflettività alle microonde degli elementi presenti nello scenario irradiato. In particolare, il sensore

I sistemi di acquisizione per il rilievo

TInRAR è costituito da un radar interferometrico ad apertura reale "coerente" (in grado quindi di emettere impulsi radar a lunghezza d'onda nota), dotato di una o più antenne emittenti e riceventi (Figura 2).



Figura 2 – Esempio di sistema radar interferometrico terrestre

La tecnica interferometrica consente il calcolo degli spostamenti lungo la linea di vista strumento-scenario (Line of Sight - LOS), attraverso il confronto delle informazioni di fase dell'onda elettromagnetica emessa e riflessa a differenti intervalli temporali. Lo spostamento è quindi calcolato, simultaneamente, su un elevato numero di punti della struttura, attraverso la relazione fondamentale riportata in Figura 2.

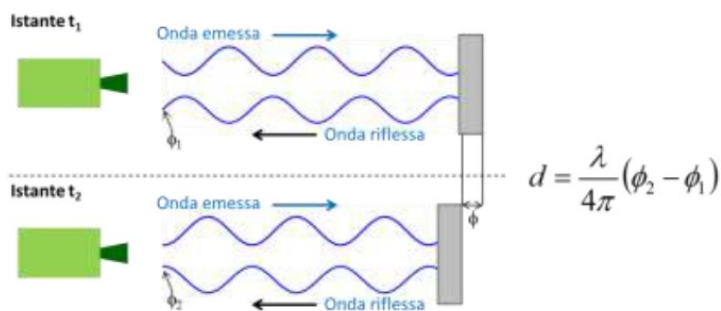


Figura 3 – Principio interferometrico per il calcolo degli spostamenti (d = spostamento misurato; λ = lunghezza d'onda emessa; ϕ = misura della fase grezza per ogni acquisizione)

In Figura 4 si riporta uno schema rappresentativo della modalità di acquisizione di un sistema TInRAR: l'area investita dal fascio d'onda radar viene discretizzata in celle di risoluzione "monodimensionali" nella direzione di *range* (ovvero lungo la linea di vista strumentale). Per ogni cella di risoluzione è possibile ricavare due parametri fondamentali:

- Ampiezza: fornisce informazioni in merito alla capacità dei target naturalmente presenti nello scenario investigato di riflettere le onde radar;
- Fase: consente di eseguire misure di spostamento attraverso il confronto tra acquisizioni eseguite a diversi intervalli temporali.

Oggetti ricadenti all'interno della medesima cella di risoluzione non sono pertanto discriminabili e contribuiscono ad un unico contributo di riflessione.

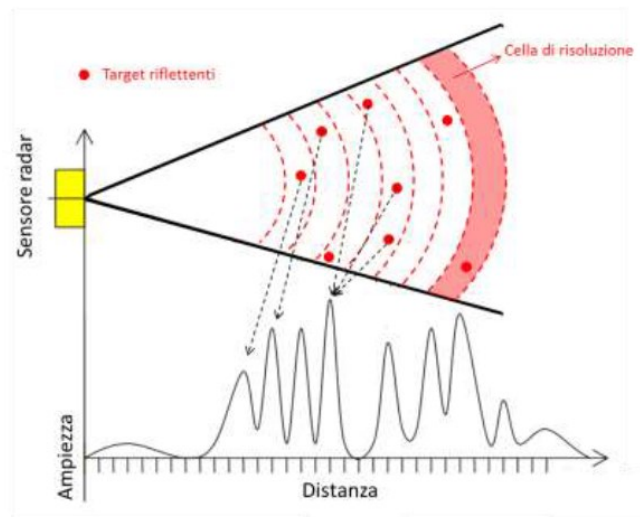


Figura 4 – Schema rappresentativo delle modalità di acquisizione di un sistema TInRAR

In Figura 5 si riporta uno schema rappresentativo di alcune geometrie di monitoraggio TInRAR per diverse tipologie di strutture, con la proiezione delle rispettive celle di risoluzione.

Le portate strumentali tipiche dei sensori attualmente in commercio variano da alcune centinaia di metri fino ad alcuni km.

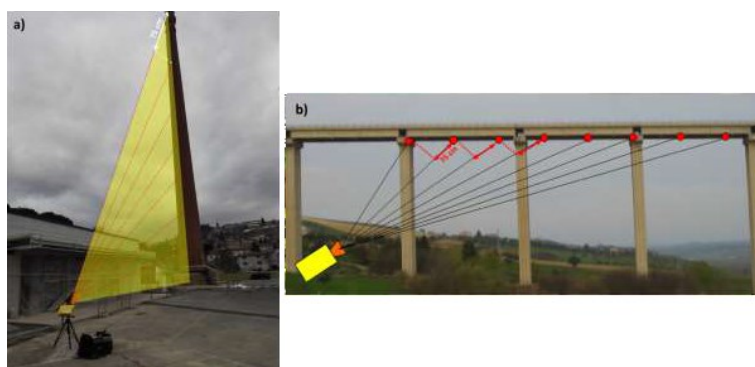


Figura 5 – Schema rappresentativo di alcune geometrie di monitoraggio TInRAR per diverse tipologie di strutture: a) torri; b) ponti

2.2.2. Criteri per la progettazione di un monitoraggio dinamico

2.2.2.1. Analisi preliminare di fattibilità e posizione della postazione di monitoraggio

L'analisi preliminare di fattibilità si basa su alcuni criteri fondamentali che dipendono sia dalle caratteristiche intrinseche della tecnica TInRAR che dalle caratteristiche della struttura oggetto di monitoraggio e dalle condizioni logistiche specifiche del luogo in cui si deve effettuare il monitoraggio.

In particolare, non essendo possibile discriminare oggetti ricadenti nella medesima cella di risoluzione in *range* (ubicati quindi alla stessa distanza dal radar), le strutture che meglio si prestano per un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR sono quelle caratterizzate da un prevalente sviluppo monodimensionale verticale (come torri, ciminiere, grattacieli) o orizzontale (come ponti, viadotti, passerelle), rispetto a strutture a prevalente estensione planimetrica sulle quali si potrebbe incorrere in problemi di ambiguità poiché oggetti (punti) corrispondenti a diversi settori della struttura che, essendo ubicati ad eguale distanza dal radar, ricadono nella medesima cella di risoluzione non sarebbero discriminabili.

2.2.2.2. Modalità di installazione

Ai fini del corretto svolgimento di un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR, è inoltre opportuno disporre di idonee postazioni di misura. In particolare, potendo misurare spostamenti lungo la sola linea di vista strumentale, è opportuno identificare almeno due (o

più) postazioni di misura dalle quali si abbia di una diversa vista prospettica della struttura oggetto di indagine.

Ad esempio, nel caso di strutture a prevalente sviluppo verticale, la configurazione standard ideale è quella visibile in Figura 6, attraverso la quale è possibile identificare i principali modi di vibrazione lungo le tre componenti di movimento (x, y e z).

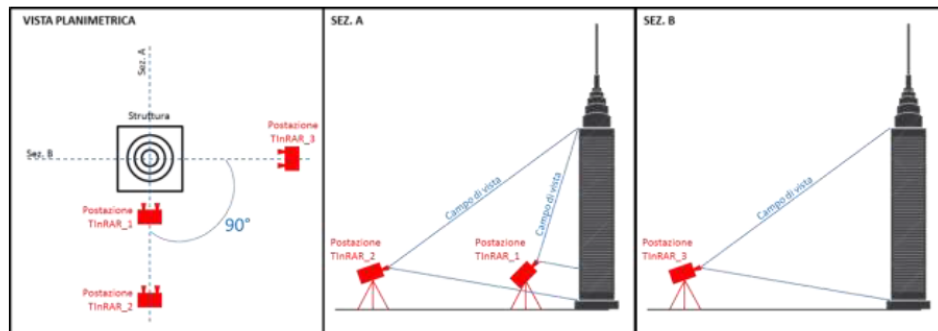


Figura 6 – Esempio di geometria di monitoraggio dinamico di una struttura a prevalente sviluppo verticale con tecnica TInRAR

In particolare, nello schema di Figura 8, la postazione TInSAR_1 è ubicata in prossimità della base della struttura e la linea di vista (LOS) risulta pressoché parallela alla struttura, consentendo di eseguire la misura degli spostamenti (e di conseguenza delle vibrazioni) lungo l'asse verticale. Di contro, le postazioni TInRAR_2 e TInRAR_3, sono ubicate ad una maggiore distanza e la linea di vista (LOS) risulta orientata prevalentemente sul piano ortogonale alla struttura consentendo di eseguire la misura degli spostamenti orizzontali. Disponendo le due postazioni ad angolo retto rispetto all'asse verticale della struttura, è infine possibile identificare tutti i modi di vibrazione orizzontali.

Conoscendo la distanza esatta delle postazioni di misura TInRAR dalla struttura e l'inclinazione del sensore radar sul piano verticale, è infatti possibile eseguire la scomposizione dei vettori spostamento di ciascuna cella di risoluzione, determinarne l'esatta quota rispetto al piano campagna e ricavare i valori di spostamento sul piano orizzontale (Figura 7).

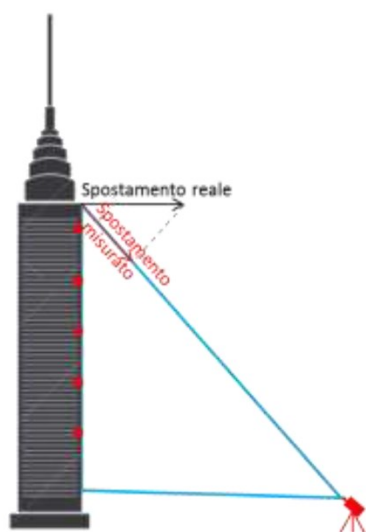


Figura 7 – Schema esemplificativo della misura degli spostamenti lungo la linea di vista strumentale (LOS) e scomposizione vettoriale per ricavare lo spostamento orizzontale

2.2.2.3. Scelta delle antenne

Le antenne per sistemi TInRAR si differenziano per l'apertura del fascio lungo il piano orizzontale e verticale, che a sua volta ne influenza il guadagno. Il criterio di scelta delle antenne si basa essenzialmente sulla tipologia di struttura da monitorare, sulla sua lunghezza (o altezza) e sulle postazioni di monitoraggio prescelte, che determinano la visibilità della struttura e lo spazio che essa ricopre nel campo di vista strumentale. E' bene tuttavia tener presente che antenne con ampia apertura angolare (sia sul piano orizzontale che verticale) sono solitamente caratterizzate da un minor guadagno che può determinare una minore ampiezza del segnale radar di ritorno e, di conseguenza, perdita di accuratezza nella misura degli spostamenti.

2.2.2.4. Definizione dei parametri di acquisizione

Nella pianificazione di un'acquisizione per un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR è bene tenere in considerazione alcuni parametri. Tra i più importanti ci sono:

- **Massima distanza di acquisizione:** è necessario impostare un valore almeno pari alla distanza tra il radar e il punto più lontano della struttura (meglio se leggermente maggiore) per evitare una possibile perdita di informazione sui settori più lontani.

Tuttavia, la mole di dati generata (e, di conseguenza, i tempi di elaborazione) incrementa in modo considerevole con l'aumento della distanza;

- Frequenza di campionamento: la scelta della frequenza di campionamento si basa sulla conoscenza preliminare delle possibili frequenze di vibrazione della struttura (molte delle quali sono disponibili in letteratura) e dovrebbe essere pari ad almeno il doppio della massima frequenza di vibrazione attesa. E' opportuno considerare che la massima frequenza di acquisizione (per alcuni sistemi TInRAR) può variare in funzione della massima distanza di acquisizione impostata e che, comunque, la mole di dati generata (e, di conseguenza, i tempi di elaborazione) incrementa in modo considerevole con l'aumento della frequenza di campionamento;
- Durata dell'acquisizione: uno dei principali vantaggi della tecnica TInRAR è quello di consentire l'acquisizione di dati per la definizione dei principali parametri dinamici delle strutture attraverso rilievi speditivi. Nella maggior parte dei casi (soprattutto se sussistono sollecitazioni naturali sulla struttura come vento o altre forzanti ambientali) sono sufficienti rilievi della durata compresa tra 15 e 30 minuti (da ciascuna postazione di monitoraggio stabilita).
- Risoluzione in range (lungo la linea di vista): è sempre preferibile impostare la massima risoluzione spaziale al fine di ottenere il maggior numero possibile di punti di misura sulla struttura.

2.3. Indagini geognostiche

2.3.1. Georadar

Il GPR (Ground Penetrating Radar), comunemente chiamato Georadar, è una metodologia non invasiva per lo studio del primo sottosuolo, che si basa sull'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse nel terreno.

Tale metodo consente di ottenere una “sezione” del sottosuolo indagato, partendo dalla superficie in direzione perpendicolare alla verticale. L'intervallo che è possibile indagare varia da una profondità di alcuni metri fino al limite di alcune decine di metri.

Il metodo si basa sull'emissione di brevi impulsi elettromagnetici ad alta frequenza, ripetuti con continuità ed emessi da un'antenna posta in prossimità della superficie da indagare. L'impulso elettromagnetico emesso si propaga dalla superficie in profondità: durante il percorso che percorre se quest'ultimo incontra una superficie di discontinuità (ovvero che separa due strati di materiale aventi caratteristiche fisiche diverse) una parte dell'energia incidente viene riflessa verso il punto di emissione ed una parte prosegue nel secondo mezzo. Le onde riflesse dalla superficie di discontinuità ritornano in superficie e vengono rilevate dall'antenna ricevente, mentre la parte di energia trasmessa che procede oltre la discontinuità stessa è disponibile per altre riflessioni su eventuali ulteriori discontinuità più profonde.

Il segnale emesso viene ripetuto, secondo una cadenza prestabilita: scelta una scansione di segnale idonea, se la strumentazione viene fatta muovere progressivamente lungo un tracciato predeterminato in superficie, si ottiene una rappresentazione bidimensionale, o sezione elettromagnetica, o "radargramma".

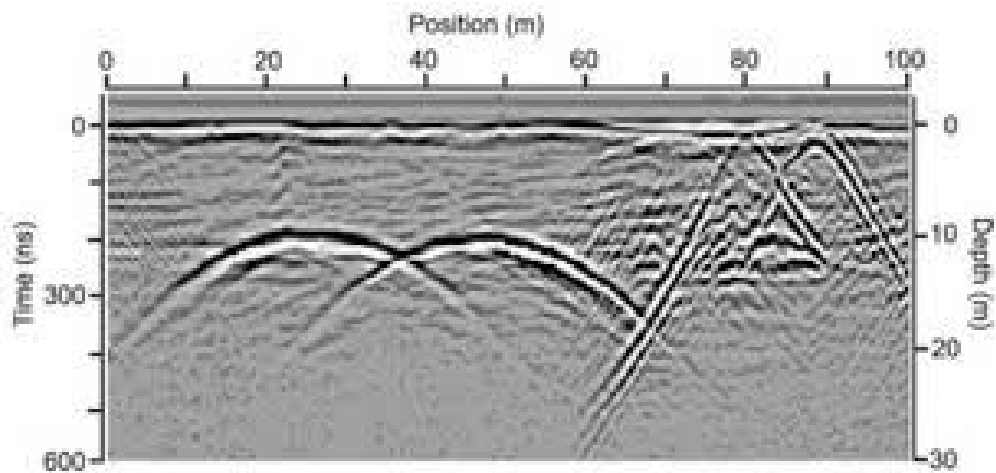


Figura 8 – Esempio di sezione elettromagnetica

Una sezione trasversale GPR è formata da tante tracce, ognuna delle quali si definisce attraverso dei campioni, rappresentanti la risposta di ogni singolo impulso emesso nel tempo. Sull'asse delle ascisse si legge un valore metrico che corrisponde al prodotto tra il numero delle tracce e la spaziatura costante che vi è tra ogni traccia; mentre sull'asse delle ordinate è presente il tempo di riflessione di ogni campione che compone ciascuna traccia. In automatico, si associa una diversa tonalità di grigio ad ogni valore di ampiezza del segnale riflesso. Se il mezzo indagato presenta delle stratificazioni caratterizzate da proprietà elettriche differenti, sull'immagine georadar si osserva la medesima geometria.

Se invece nel mezzo analizzato è presente un oggetto sepolto, la somma delle riflessioni generate dai diversi impulsi inviati dall'antenna emittente, restituiscono sull'immagine un'iperbole di diffrazione: queste sono il risultato dell'insieme delle riflessioni generate da un oggetto presente nel mezzo indagato. In presenza di una discontinuità, infatti, il segnale georadar sotto forma di onda elettromagnetica interagisce con questa generando una riflessione. L'onda riflessa si orienta in modo differente in seguito al movimento dello strumento restituendo un'iperbole come mostrato in Figura 9.

I sistemi di acquisizione per il rilievo

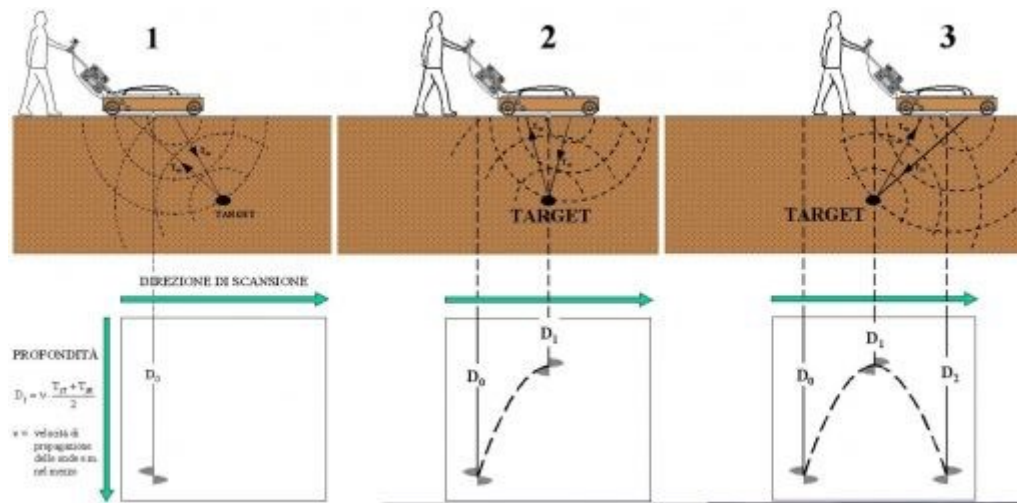


Figura 9 – Modalità di acquisizione GPR con generazione di un'iperbole di diffrazione in presenza di un target sepolto

La radiazione che si propaga non è isotropica e questo determina che ad una distanza “x”, lungo la direzione di scansione, si cominci ad avere interferenza, ovvero si registri un primo segnale di riflessione dell’oggetto anche se lo strumento non si trova perpendicolarmente ad esso (immagine a sinistra della figura). Spostandosi con l’antenna, si continuano a ricevere segnali di riflessione, fintanto che l’antenna, oltrepassato l’oggetto, non raggiunge nuovamente la distanza “x” da esso (immagine a destra della figura). Si generano così delle iperboli di diffrazione, o artefatti, che sono il risultato dell’interazione dell’energia elettromagnetica con la discontinuità o target sepolto. Per questo motivo, le sezioni radar non sono rappresentative delle dimensioni effettive dell’oggetto che provocano la riflessione. Inoltre, la tangente dell’iperbole corrisponde alla velocità delle onde in corrispondenza del mezzo attraversato.

Per calcolare la profondità delle riflessioni è necessario determinare la velocità di propagazione V_m delle onde radar nei livelli indagati. Questa è legata principalmente alle caratteristiche fisico-elettriche dei mezzi attraversati e viene stimata o calcolata attraverso varie possibilità di analisi dei segnali o con prove sperimentali di taratura. Nota la V_m , è possibile ottenere una sezione, del tipo "spostamento (lungo il tracciato) / profondità (delle superfici riflettenti)". La frequenza del segnale elettromagnetico emesso può variare

generalmente da decine a oltre 1000 MHz, quindi nel campo delle frequenze "radar" VHF ed UHF, cioè delle onde cortissime (metriche) e ultracorte (decimetriche)

Ogni antenna ha una sua frequenza nominale di emissione, e la sua scelta viene adottata di volta in volta, a seconda delle specifiche problematiche da affrontare. In generale, ad una minore frequenza del segnale emesso (lunghezza d'onda maggiore) corrisponde una maggiore penetrazione, ma conseguentemente una minore sensibilità alla presenza di eterogeneità circoscritte. L'antenna viene fatta scorrere in superficie, mentre i segnali captati dalla componente ricevente vengono visualizzati direttamente sul monitor dello strumento (o di un pc collegato ad esso), per il controllo delle funzioni dello strumento e della qualità delle registrazioni; nel frattempo, i segnali vengono registrati in formato digitale per la successiva fase di elaborazione ed interpretazione, con l'ausilio di software specifici.

La tecnica GPR viene frequentemente utilizzata per l'individuazione plano-altimetrica dei sottoservizi interrati come condotte idriche, fognarie e del gas.

Nel campo dell'archeologia e dei beni culturali invece sta avendo grande successo per la ricerca di strutture murarie, o comunque presenza di preesistenze nel sottosuolo, che sono state sepolte nel corso dei secoli.

3. Il “sistema urbano”

La capacità di acquisizione degli strumenti di cui al capitolo precedente in rapporto al tempo di acquisizione produce un'enorme quantità di dati, che cresce in considerazione dell'estensione di alcuni rilievi.

La questione dell'archiviazione, gestione e consultazione del dato rilevato diventa quindi sempre più un tema e un'esigenza da affrontare per poter sfruttare quanto più efficientemente il risultato delle campagne di rilievo.

All'interno dell'Azienda Tecno Art, in cui la presente tesi di dottorato è stata svolta, si è lavorato al fine di ottenere un valido strumento che potesse ambire a questi compiti coinvolgendo diverse competenze professionali.

Il risultato cui si è giunti, a valle di alcuni anni di sviluppo, è un sistema integrato in grado di gestire dati provenienti da diverse fonti e di diversa tipologia (acquisizione laser scanner terrestri e mobili, nuvole di punti derivate dalla fotogrammetria, fotografie, documenti, elaborati tradizionali 2D, etc).

IQ System, questo il nome che è stato attribuito al sistema, è strutturato come una piattaforma webGIS in grado di presentare documenti di testo, gallerie fotografiche, nuvole di punti e ambienti virtuali tramite l'uso di diversi layout, pensati per rendere più agevole la consultazione e la modifica dei dati.

La compatibilità multimediale di IQ System è stata raggiunta tramite l'integrazione graduale, nel corso del suo sviluppo, di plugin e moduli di terze parti, buona parte dei quali rilasciati come software liberi e open source. Questi moduli sono stati modificati per interagire in maniera ottimale tra di loro e con il nucleo software su cui è costruito IQ System e, in seguito, sono stati estesi per aggiungere nuovi strumenti e funzionalità.

Nella sua definizione più semplice, IQ System è un'applicazione windows che fa da contenitore a dei layout web-based in cui sono visualizzati dati precedentemente inseriti in un database di progetto. Allestire i dati in pagine web dinamiche permette di avere layout sempre aggiornati in base alle informazioni correntemente disponibili nel database online. L'utilizzo di un'applicazione contenitore per queste pagine garantisce la possibilità di interagire con i file e gli altri applicativi presenti sul terminale su cui essa viene lanciata.

3.1. Lo stato dell’arte e il panorama commerciale

La documentazione del patrimonio culturale mira a comprendere il manufatto studiato e raccogliere tutte le informazioni necessarie per conservarlo e valorizzarlo. Oggi, il termine “Cultural Heritage Documentation” identifica il lavoro interdisciplinare svolto da diversi esperti che raccolgono, interpretano e condividono dati e risultati su una piattaforma comune. Queste informazioni garantiscono una migliore comprensione del manufatto esaminato, aiutando la creazione di un database che può essere utilizzato per promuovere e migliorare il manufatto (Rinaudo et al., 2007; Seker et al., 2010).

Grazie alle potenzialità offerte dalla tecnologia digitale, sia software che hardware, è possibile gestire grandi quantità di dati eterogenei e renderli accessibili a esperti di diverse discipline. La condivisione richiede sempre più sistemi dinamici di visualizzazione sia bidimensionale che spaziale. La rappresentazione digitale è lo strumento preferito di un numero crescente di esperti per interrogare e interpretare dati anche da punti di vista drasticamente diversi. La tecnologia digitale diventa uno strumento straordinario per l’analisi e la sintesi dei dati ed è più efficace quando più ricercatori coinvolti nello stesso studio condividono progetti e obiettivi (Battini and Vecchiattini, 2018).

Nel campo del Cultural Heritage numerosi sono gli studi e le applicazioni indirizzati alla creazione di piattaforme in grado di gestire una pluralità di dati legati al manufatto. L’obiettivo comune è quello di generare modelli tridimensionali complessi che possano essere visualizzati ed esplorati in modo interattivo su piattaforme web e su applicazioni sviluppate per dispositivi mobili, permettendo la visualizzazione in tempo reale del sistema di informazioni aggiuntive direttamente sull’oggetto reale (Battini, 2013; Battini et al., 2013; Battini and Landi, 2015; Mingucci et al., 2012).

Un approccio simile, volto alla gestione dell’intero ciclo di vita dei beni culturali, è offerto dal progetto SACHER (Smart Architecture for Cultural Heritage in Emilia-Romagna). Il progetto si è concretizzato nel luglio 2018 nella realizzazione di una innovativa piattaforma ICT, disponibile su Web, che facilita l’accesso ai dati relativi ai Beni Culturali in tutta la fase della loro vita, garantendone l’accesso a specialisti del settore e al tempo stesso al pubblico (Apollonio et al., 2017; Bertacchi et al., 2018).

Sempre nell’ottica di un’organizzazione strutturata dei dati raccolti e della loro condivisione, ci sono esempi di piattaforme pensate per ospitare veri e propri sistemi HBIM al proprio interno.

Il “sistema urbano”

Il progetto Inception sviluppa una piattaforma Web semantica a standard aperto per Building Information Models for Cultural Heritage (HBIM) da implementare in Realtà Aumentata (VR e AR) di facile utilizzo utilizzabile su dispositivi mobili (Di Giulio et al., 2019; Llamas et al., 2016)

Un altro esempio è proposto dal progetto eBIM (Existing Building Information Modeling per la gestione dell'intervento sul costruito esistente). Questo si pone come strumento per la realizzazione di un approccio inclusivo all'applicazione del Building Information Modeling nei processi di intervento e gestione del costruito esistente, favorendo la collaborazione tra tutti gli attori della filiera, implementando le tecnologie e le procedure di acquisizione, integrazione, modellazione, rappresentazione e estrazione di dati digitali integrati a supporto di processi di gestione dell'intervento sul costruito (Università di Bologna, 2020).

Parallelamente ai casi sinora citati, dove le piattaforme sono strutturate collegando le informazioni ai modelli tridimensionali degli oggetti, vi sono altri esempi che fanno della nuvola di punti l'oggetto base da strutturare e arricchire.

Lo strumento che molte di queste piattaforme usano è Potree, un renderer di nuvole di punti basato su WebGL open source gratuito per nuvole di punti di grandi dimensioni, che si basa sul progetto TU Wien Scanopy e sui progetti di ricerca Harvest4D, GCD Doctoral College e Superhumans (Schütz, 2016; Schütz et al., 2020).

(Boulanger et al., 2019), pur limitandosi a un piccolo caso studio circoscritto ad un'antica draga in Canada, riconosce l'efficacia e il potenziale del renderer open source Potree.

Da tale applicazione sperimentale emergono già chiaramente alcuni dei possibili vantaggi di questo approccio basato su collegamenti html per accedere alle nuvole di punti: eliminazione della necessità di software specializzati proprietari, superamento della necessità di requisiti hardware particolarmente dispendiosi, velocità e facilità di accesso al dato e conseguente possibilità di consultazione.

Piattaforme basate sulle nuvole di punti sono inoltre rintracciabili nel mondo commerciale. Seppur limitate alle specifiche esigenze del proprio settore di mercato, le case produttrici delle stesse strumentazioni hardware e software propongono esempi di sistemi di integrazione e gestione del dato di rilievo.

Leica-HExagon proopone la piattaforma HxDR, basata su un database online di mappe 3D texturizzate e georiferite, mantenuta dal produttore e accessibile via internet browser. L'utente può usare queste mappe per caricare modelli 3D, entità CAD e nuvole di punti

generate da Reality Capture, posizionandole nel contesto del mondo reale in cui vengono previste. Gli asset utente che non sono già in formato poligonale vengono convertiti automaticamente dalla piattaforma.

L’istanza del visualizzatore virtuale è privata, ma è possibile esportare delle clip video impostando un percorso “flythrough” da far seguire alla telecamera. Il sistema permette anche di creare dei percorsi con una serie di posizioni osservabili in prima persona, utilizzando come input delle foto panoramiche. (Leica Hexagon, n.d.)

In modo simile a HxDR, anche Clarity della Trimble permette di inserire modelli 3D e nuvole di punti in un preciso contesto geografico, ma in questo caso la mappa è un tileset di immagini satellitari a cui è stato applicato un effetto di rilievo tridimensionale corrispondente all’altezza reale dell’ambiente. Le nuvole di punti caricate nel sistema non verranno convertite in formato poligonale, ma inserite direttamente sulla mappa, permettendo quindi la consultazione contemporanea di nuvole e modelli. Tramite un’apposita funzione, è possibile creare un link pubblico o privato da poter condividere con collaboratori e clienti, che avranno accesso al visualizzatore e alla scena creata in modalità di “sola lettura”, non modificabile. (Trimble, n.d.)

L’azienda NavVis produce dispositivi laser scanner montati su carrelli e specializzati nella scansione di ambienti interni, che vengono riprodotti come nuvole di punti e set di foto panoramiche. Gli scanner vanno usati congiuntamente alla piattaforma IndoorViewer: un ambiente misto che permette di visualizzare gli ambienti scansionati come nuvola di punti o come set di foto a 360°. Mentre in modalità nuvola gli ambienti sono esplorabili con una visuale a movimento tridimensionale libero, in modalità panorama si osserva gli ambienti muovendosi tra le posizioni in cui sono state scattate le foto, navigando nei percorsi generati da queste allo stesso modo in cui si navigherebbe nella modalità Streetview di Google Maps. Il visualizzatore include un riquadro interattivo contenente una minimappa divisa per piani, che può essere generata automaticamente dal sistema oppure caricata manualmente come immagine. Sono anche inclusi degli strumenti di misurazione, per fare stime precise degli ambienti basate sui punti della nuvola.

Il design degli scanner e della piattaforma web prodotti da NavVis puntano a offrire degli strumenti facili da usare e pratici, utili in particolar modo al monitoraggio degli ambienti nel corso di un lungo periodo di tempo tramite scansioni periodiche. (NavVis, n.d.)

Il “sistema urbano”

Un'ulteriore esempio è la piattaforma web di e-cassini che è specializzata nella visualizzazione di nuvole di punti. La piattaforma permette di caricare nuvole in una scena virtuale, navigabile in prima persona, e offre strumenti per effettuare misurazioni e per creare disegni vettoriali sulla nuvola. E' anche possibile aggiungere disegni alla scena importando dei file di disegno vettoriale, e allo stesso modo si possono esportare i disegni nella scena in forma di file di disegno vettoriale. (e-cassini, n.d.)

La piattaforma in seno all'azienda Tecno Art cerca di accogliere al suo interno molte delle istanze comuni alle piattaforme passate in rassegna, con la propensione ad una gestione dei dati che non si limiti ad un singolo edificio ma che si estenda ad una scala urbana.

3.2. Metodologia: implementazione di una piattaforma interattiva 3D

L’obiettivo che l’azienda si era posta agli inizi del percorso di sviluppo della piattaforma era quello di creare una piattaforma aperta in grado di visualizzare e gestire l’intera gamma di dati provenienti dal rilievo. IQ System è, quindi, il risultato di alcuni anni di lavoro che hanno visto impegnate differenti competenze e figure professionali.

Con il presente dottorato di ricerca si è cercato di specializzare la piattaforma in un ambito più sfidante, quello dell’architettura storica, verificando se i requisiti della piattaforma fossero sufficienti per la ricchezza degli elaborati necessari e l’elevato dettaglio dei modelli. L’obiettivo era di fatto un miglioramento della piattaforma per casi d’uso specifici della rappresentazione e rilievo dell’architettura storica.

Nel capitolo corrente verrà descritta la piattaforma nel suo complesso: la genesi, il percorso di sviluppo con le varie implementazioni introdotte (3.2.1) sino alla sua attuale struttura (3.2.2).

Nel capitolo 3.3 verranno descritti invece i casi studio attraverso i quali sono stati sperimentati e validati gli approfondimenti e i miglioramenti affrontati direttamente nel corso della ricerca del dottorato.

3.2.1. Fasi di sviluppo

I primi prototipi di IQ System permettevano la visualizzazione di mappe, tramite l’utilizzo di OpenLayers e di servizi di tileset come Bing e OpenStreetMap, sulle quali potevano essere sovrapposti dei layer di disegno vettoriali. Questi layer dovevano essere precedentemente preparati utilizzando Qgis, un’applicazione GIS stand-alone open source, disegnandoli manualmente nel programma o importando dei file di disegno di tipo dwg o dxf. IQ permetteva anche di aprire, in finestre esterne e separate, delle pagine web basate sul plugin Potree, contenenti un visualizzatore di nuvole di punti. Con questo visualizzatore era possibile esplorare una nuvola di punti in prima persona, e anche usare dei semplici strumenti per effettuare misurazioni e sezioni sulla nuvola.

La preparazione dei contenuti e delle pagine in cui presentarli era però poco pratica per l’utente, e per questo motivo si è lavorato al primo significativo upgrade per la piattaforma: l’implementazione di un apposito CMS (Content Management System) sul quale la piattaforma si sarebbe d’ora in poi basata per la preparazione dei contenuti e la successiva

Il “sistema urbano”

visualizzazione. Tramite questo sistema, l’utente poteva accedere ad una sezione “backoffice” della piattaforma, in cui era possibile caricare i dati preparati tramite gli strumenti appositi (come QGis o Potree Converter), ma anche documenti pdf e gallerie fotografiche. In questo modo l’utente era in grado di organizzare i layer vettoriali per unità-mappe, con riferimento ad una specifica posizione geografica di partenza, e in più poteva creare una collezione di schede e di contenitori in cui archiviare documenti e rilievi fotografici, ma anche collegamenti a nuvole di punti renderizzate dal visualizzatore Potree.

Il successivo passo evolutivo per la piattaforma si è concentrato sul rendere l’utilizzo del plugin Potree più trasparente all’utente. Innanzitutto, si è preparata un’applicazione desktop per facilitare e velocizzare la conversione di nuvole di punti dal formato *.las al formato necessario per la catalogazione in IQ System. Poi, si è proceduto a modificare più approfonditamente il plugin, fino a far diventare il visualizzatore di nuvole di punti una componente “embedded” delle pagine di IQ, un elemento dei suoi layout con cui interagire tramite l’interfaccia del sistema a cui era ora del tutto collegato. Questa innovazione ha inoltre permesso la creazione di visualizzazioni a pannelli multipli, ad esempio per mostrare nella stessa schermata un riquadro interattivo per esplorare la nuvola di punti, affiancato da una visuale sulla mappa centrata nella posizione in cui quella nuvola è collocata geograficamente. Questo sistema è particolarmente appropriato per la visualizzazione di scansioni eseguite con Pegasus 360 di Leica, un dispositivo che permette di rilevare, lungo una serie di posizioni in un percorso attraversato dallo scanner, una nuvola di punti e serie di foto che compongono una immagine panoramica a 360 gradi per ciascuna delle posizioni.

IQ presenta queste scansioni in un layout a tre sezioni: la sezione a sinistra è una vista su mappa su cui è disegnato il percorso del tracciato Pegasus; la sezione centrale ospita una banda scorrevole contenente delle thumbnail di tutte le posizioni del percorso, con in basso le anteprime degli scatti effettuati nella posizione corrente; la sezione a destra contiene una visuale sulla nuvola di punti registrata dallo scanner. Le tre sezioni comunicano tra loro per aggiornarsi a vicenda, in modo che se l’utente si muove nella sezione a destra (nel visualizzatore di nuvole) o seleziona una thumbnail nella sezione centrale, le altre sezioni aggiornano subito il punto del percorso indicato. (Figura 10)

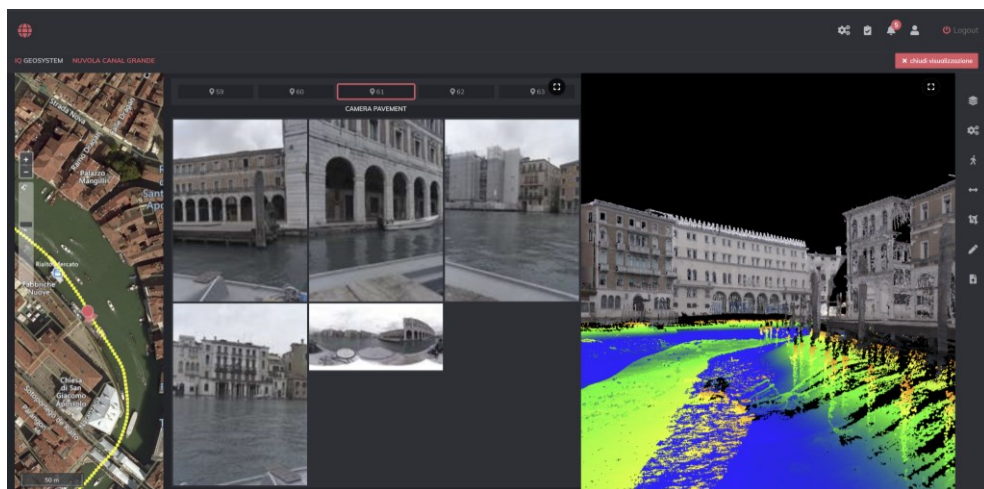


Figura 10 – Piattaforma IQ: layout a tre sezioni

Estendendo ulteriormente i plugin e le library utilizzate nello sviluppo di IQ System, sono state poi aggiunte funzionalità non previste nelle loro versioni originali. Nelle mappe è stata aggiunta un’opzione, raggiungibile con un menu contestuale aperto al click destro del mouse, per aggiungere punti di interesse georeferiti: l’utente può usare questo strumento per prendere nota di posizioni importanti assegnando un nome e un blocco di testo per descriverla, e anche un eventuale collegamento a una scheda dati precedentemente inserita nella piattaforma. I punti d’interesse creati con questa funzione possono anche essere associati a sensori per il rilevamento delle condizioni ambientali sparsi sul territorio. I dati ottenuti in tempo reale da questi sensori possono essere visualizzati su mappa, ma anche sulla dashboard di IQ System, che ospita un pannello notifiche in cui viene segnalato quando i valori rilevati da ciascun sensore supera determinate soglie di sicurezza. Anche nel visualizzatore di nuvole di punti sono state aggiunte nuove funzioni, come la possibilità di aggiungere modelli 3D alla scena, posizionandoli in una coordinata precisa oppure spostandoli manualmente nell’ambiente virtuale usando delle apposite maniglie visualizzate a schermo. In più, si è implementato un sistema per l’aggiunta di disegni vettoriali nelle scene virtuali. Usando uno strumento di disegno, l’utente può inserire punti e polilinee 3D direttamente nella scena, oppure può importare disegni caricando un file di disegno *.dxf. Tutti i disegni inseriti in scena possono poi essere selezionati ed esportati in un file dxf, permettendo all’utente di poterli esaminare e modificare anche con altri applicativi. E’ importante notare come questi ultimi nuovi

Il “sistema urbano”

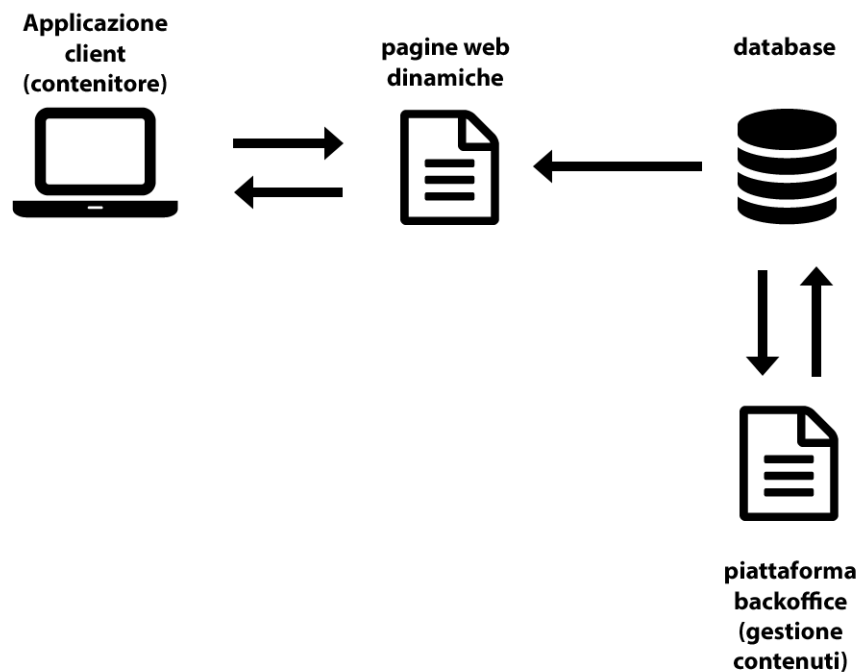
strumenti, che permettono all'utente di inserire informazioni aggiuntive su mappe e nuvole di punti in maniera diretta e immediata, senza passare per il sistema backoffice, sono stati progettati in modo da creare elementi permanenti che vengono registrati nel database di progetto, in modo da non essere persi tra una sessione di utilizzo della piattaforma e la successiva.

Sempre nell'ottica di ampliare l'usabilità della piattaforma, si è poi pensato di rendere la piattaforma IQ System accessibile da dispositivi mobili. Per via della limitatezza dell'input via touch screen, non tutte le funzionalità sviluppate finora sarebbero state effettivamente utilizzabili su smartphone o tablet, quindi sono state progettate dei layout dedicati all'uso tramite app mobile, così come sono stati implementati dei controlli e delle interfacce del tutto nuove per poter utilizzare strumenti come l'inserimento e la modifica di punti d'interesse su mappe o di misurazioni sulle nuvole di punti.

3.2.2. La piattaforma: struttura e funzionalità

IQ System è un webGIS multiutente pensato per catalogare e visualizzare set personalizzabili di informazioni di carattere ambientale, urbanistico e infrastrutturale, con un’attenzione particolare all’integrazione di elementi grafici bidimensionali, come immagini di tipo vettoriale e raster, ad elementi grafici tridimensionali, quali le nuvole di punti e i modelli poligonali.

IL sistema IQ è costituito da diversi sottosistemi software integrati. Questa modularità permette di concentrare lo sviluppo su elementi separati e più stabili, ma anche di rendere il sistema nel complesso più flessibile ed estendibile con funzioni e strumenti avanzati.



I dati sono visualizzati su pagine web dinamiche che vengono mostrate all’interno di un’applicazione client. Queste informazioni sono prelevate da un database dedicato, il quale viene gestito tramite una piattaforma “backoffice” accessibile via web browser.

L’utente interagisce col sistema attraverso i due moduli alle estremità di questa struttura: l’applicazione client e la piattaforma backoffice, in entrambi i casi previa autenticazione con

Il “sistema urbano”

le credenziali di accesso personali (username e password). Limitatamente ai permessi di accesso garantiti al proprio profilo, ogni utente può utilizzare il client IQ per accedere ai dati contenuti nel sistema e consultarli, oppure utilizzare la piattaforma backoffice per aggiungere, modificare o eliminare dati nel sistema.

3.2.2.1. Il Client IQ System

Avviando il client IQ System ci viene presentato un modulo di autenticazione. Una volta inserite le proprie credenziali, si può quindi accedere alla “dashboard”. Da questa schermata panoramica iniziale è possibile accedere ai diversi moduli all’interno di IQ, cliccando su uno degli elementi nell’area centrale della pagina, o utilizzando i menu a tendina contenuti nel pannello a sinistra.

In IQ System sono previste tre macrosezioni, elencate sotto la dicitura “Moduli IQ” sul pannello a sinistra: DataSystem, GeoSystem, VRSystem.

3.2.2.1.1. DataSystem

Il Modulo DataSystem contiene le schede di progetto, il database relazionale propriamente detto. Queste schede sono organizzate come una collezione di contenitori, analoghi alle cartelle di un moderno sistema operativo, in cui possono essere contenuti documenti, immagini, o collegamenti a indirizzi web.

Cliccando sulle cartelle visibili nella schermata è possibile esplorarne il contenuto, e cliccando su uno dei documenti elencati, scaricarli sul proprio computer. In caso si acceda ad un file di tipo PDF, questo verrà aperto in una finestra popup, dove sarà possibile visionarlo. Se invece si seleziona un file di tipo immagine, si accederà ad una visuale slideshow a schermo intero, dove poter visionare in dettaglio l’immagine selezionata e le altre presenti nella stessa cartella.

Dal pannello a sinistra dello schermo, si può accedere a una funzione di ricerca: utilizzandola è possibile trovare elementi contenuti in una o più schede presenti nel database.

3.2.2.1.2. GeoSystem

Il modulo Geosystem offre invece una visuale incentrata su una mappa raster o vettoriale georeferita. Si può accedere ad una delle mappe disponibili cliccando su uno degli elementi presentati al centro della dashboard o selezionandone una dalla lista nel pannello a sinistra.

La visuale sulla mappa, al centro dello schermo, può essere traslata tenendo premuto il tasto sinistro del mouse e trascinando nella direzione desiderata. Si possono effettuare uno zoom-in o uno zoom-out ruotando la rotella del mouse rispettivamente in alto o in basso, o usando lo strumento sul bordo sinistro della mappa.

Nell’area più a destra, invece, sono situati gli strumenti della mappa correntemente in uso. Lo strumento “livelli” apre un pannello con una lista di diversi elementi, suddivisi per categorie, detti “layer”, che sono dei retini che vengono sovrainpressi sulla mappa in una propria precisa posizione. Questi possono contenere immagini raster, come foto ad alta risoluzione, o disegni di tipo vettoriale, come percorsi, tracciati, o vere e proprie planimetrie. Per visualizzare un layer basta attivarlo cliccando sulla riga che riporta il suo nome. Una volta attivato un layer è possibile centrare la visuale su di esso facendo click sull’icona all’estrema destra della stessa riga, oppure rendere il layer semitrasparente usando un piccolo slider posizionato accanto.

Alcuni layer possono contenere collegamenti a dati e/o attributi relativi all’area su cui sono situati. Cliccando su un layer di questo tipo si aprirà, in corrispondenza del puntatore, un piccolo pannello pup-up contenente un estratto riassuntivo degli attributi relativi all’entità e una serie di bottoni relativi a questi dati, che possono essere visualizzati con un ulteriore click su di essi.

Se si è selezionato la visualizzazione estesa degli attributi si passerà ad una visuale a due sezioni: a destra resterà una visuale sulla mappa, mentre a sinistra sarà presente un pannello con l’elencazione in forma tabellare di tutti gli attributi associati all’entità selezionata.

Se si è invece selezionato un elemento del DataSystem, si passerà ad una visuale a due sezioni: a destra resterà una visuale sulla mappa, mentre a sinistra sarà presente un pannello con un layout analogo a quello del DataSystem, in cui sarà possibile esplorare il contenuto dell’intera scheda correlata.

Se l’elemento selezionato è una nuvola di punti, si passerà invece ad una differente visuale a due sezioni. La sezione a sinistra, piuttosto ridotta in larghezza, manterrà una vista sulla mappa, mentre la sezione a destra ospiterà una scena tridimensionale in cui sarà renderizzata la nuvola di punti. Ci si può muovere all’interno della visuale 3D utilizzando i tasti freccia o i tasti W, A, S, D, ruotando la visuale con i tasti sinistro e destro del mouse insieme ad un movimento del mouse stesso. Ulteriori opzioni di movimento e di rendering della nuvola sono accessibili aprendo il pannello a scomparsa tramite un’icona in alto a sinistra nella

Il “sistema urbano”

visuale tridimensionale. Durante il movimento all'interno dello spazio virtuale della nuvola, nella sezione contenente la mappa verrà aggiornata in tempo reale la posizione di una icona rotonda verde, corrispondente alla posizione attuale della telecamera con cui stiamo osservando la nuvola di punti.

Se il layer interattivo rappresenta invece una traiettoria seguita da un mobile scanner, portare il puntatore sulla traiettoria farà comparire nel punto corrispondente un'icona rotonda blu, insieme ad un piccolo pannello contenente una foto. Questa anteprima corrisponde alla foto frontale effettuata dallo scanner quando è passato in quel punto della traiettoria. Effettuando quindi un click col mouse si passa ad una nuova visuale, questa volta a tre sezioni. La sezione a sinistra contiene un frammento della mappa, centrato sul punto della traiettoria selezionato. La sezione centrale ospita in alto una banda scorrevole contenente le anteprime (etichettate numericamente) di tutte le posizioni del percorso, e in basso una griglia di cui ogni cella contiene l'anteprima di uno degli scatti effettuati dallo scanner nella posizione corrente. Per esaminare più dettagliatamente uno di questi scatti è sufficiente cliccarci sopra per aprire la foto a schermo intero. La sezione a destra invece contiene un rendering tridimensionale della nuvola di punti corrispondente all'intera traiettoria.

Anche se le tre sezioni mostrano ciascuna una prospettiva diversa sullo stesso percorso, funzionano in realtà in maniera coordinata: per cambiare la posizione della traiettoria osservata si può selezionare un punto sulla mappa nella sezione a sinistra oppure selezionare una delle anteprime nella parte alta della sezione al centro. In entrambi i casi, tutte le tre sezioni verranno aggiornate, mostrando rispettivamente la posizione sulla mappa, le foto scattate, e la posizione nella nuvola di punti corrispondente alla posizione selezionata. Analogamente, mentre ci si sposta all'interno della nuvola di punti, nella sezione a destra, l'icona verde corrispondente alla posizione sulla mappa viene aggiornata costantemente.

Un'ulteriore caratteristica del sistema di rendering utilizzato per le nuvole di punti è la capacità di visualizzare, nella stessa scena virtuale, anche dei modelli 3D poligonali. Questo permette di mostrare il prototipo di una struttura non esistente o in fase di progettazione posizionandola nel contesto in cui verrà in futuro inserita nel mondo reale, rappresentato dalla nuvola di punti.

Tornando al pannello strumenti sul lato destro della mappa, dopo lo strumento “livelli” troviamo lo strumento “ricerca”, che permette di trovare uno o più livelli all'interno della mappa in base ad una parola chiave specificata.

Successivamente, c'è lo strumento “misurazioni”, col quale è possibile tracciare sulla mappa una o più linee rette, per le quali verrà calcolata la lunghezza totale, o dei poligoni irregolari, di cui verrà calcolata l'area.

Infine, lo strumento “elenco mappe” offre una lista delle mappe correlate a quella corrente, rendendole facilmente raggiungibili.

3.2.2.1.3. VRSystem

Il terzo modulo IQ, VRSystem, non ha a che fare direttamente con alcun dato presente nel database, bensì con applicazioni di realtà virtuale esterne. Queste applicazioni, sviluppate separatamente, sono costituite da scene virtuali contenenti riproduzioni di ambienti ed edifici realmente esistenti tramite modelli 3D ad alta definizione, integrati con un set di dati inerenti all'ambiente riprodotto. Collegare queste applicazioni esterne e renderle avviabili da VRSystem permetterebbe di usufruire di un sistema di comunicazione tra l'applicazione e IQ System, ad esempio permettendo di raggiungere su una mappa di IQ un punto specifico che si è selezionato nello spazio virtuale dell'applicazione esterna.

IQ System include anche un sistema di notifiche. Queste non fanno parte di alcun modulo IQ, ma sono presenti nella dashboard. Le notifiche servono a tenere traccia dello stato e delle segnalazioni registrate per alcuni elementi presenti su una mappa, anche tramite la lettura in tempo reale dei dati provenienti da sensori per il rilevamento delle condizioni ambientali sparsi sul territorio.

3.2.2.2. La piattaforma backoffice

L'accesso alla piattaforma backoffice è previsto tramite l'utilizzo di un web browser. Innanzitutto ci è richiesto l'inserimento di username e password, gli stessi che utilizzeremo in fase di accesso al sistema tramite il client IQ, a questo punto si apre la dashboard del backoffice.

A differenza della dashboard raggiunta usando il client, qui al centro non avremo nessun collegamento veloce agli elementi già presenti nel database. Dalla barra a sinistra o dai bottoni in cima alla pagina saremo però in grado di accedere alle aree relative ai 3 moduli IQ, per gestire rispettivamente schede, mappe, e collegamenti ad applicazioni di realtà virtuale esterne. Nella barra in alto è anche presente una funzione di ricerca, che permette di trovare elementi, nella sezione schede o mappe, corrispondenti ad una parola chiave inserita.

Il “sistema urbano”

3.2.2.2.1. Gestione schede

Accedendo alla gestione schede viene presentata a schermo una lista delle schede già presenti nel sistema, divise per gruppi. Cliccando sul nome del gruppo è possibile accedere alle schede contenute, e alle relative impostazioni, mentre si può creare una nuova scheda premendo il bottone “nuova scheda” in alto e al centro della pagina.

Creando una nuova scheda, è possibile scegliere se abilitarla o meno. Una scheda non abilitata risulta non visibile ad alcun utente quando si utilizza il client IQ, e può essere utile in caso si stia preparando una scheda che non si vuole pubblicare subito. È obbligatorio assegnare un titolo alla scheda, mentre assegnarle un gruppo di appartenenza potrà collocare la scheda creata in uno dei gruppi visti nella schermata precedente. È possibile scrivere una descrizione per la scheda, che verrà riportata sotto il titolo della stessa quando verrà aperta.

Compilati i campi desiderati, si può premere il bottone “salva le modifiche” per salvare questa nuova scheda e tornare alla lista precedente, oppure premere il bottone “gestione contenitori della scheda” per cominciare a creare il vero e proprio contenuto della scheda.

Nella lista delle schede troveremo, a sinistra di ciascun elemento dell’elenco, un’icona rotonda colorata di verde in corrispondenza di una scheda abilitata, e di rosso se la scheda è disabilitata. Sulla destra invece troviamo quattro bottoni. Il primo da sinistra permette di accedere ad una schermata analoga a quella di creazione scheda, per modificare i dati precedentemente inseriti. Il secondo bottone porta alla pagina di gestione schede. Il terzo apre invece il pannello dei permessi di accesso alla scheda. In questo pannello troviamo un elenco di tutti gli utenti registrati e per ciascuno si può scegliere se permettere o negare l’accesso alla scheda. Un utente per il quale è stato disabilitato l’accesso ad una scheda non sarà in grado di aprirla e accedere ai dati contenuti presenti in essa, ma sarà comunque in grado di vederne il nome nella lista delle schede presenti nel sistema o nei risultati di una ricerca.

Premendo il bottone “contenitori” di una delle schede, possiamo visionare la struttura dei contenitori creata per quella scheda. Questa è una struttura multilivello che rispecchia la gerarchia delle “cartelle” in cui troveremmo disposti i dati accedendo al contenuto della scheda dal client.

Si può creare un nuovo contenitore premendo il bottone “aggiungi contenitore” in alto. Cliccando sul nome del nuovo contenitore comparirà un piccolo popup in cui poter digitare un nuovo nome, mentre tenendo premuto il tasto sinistro del mouse e trascinando il

contenitore saremo in grado di posizionarlo tra gli altri contenitori presenti, inserendolo più in profondità all'interno della gerarchia se lo si trascina verso destra.

Ogni contenitore presenta sul lato destro dei bottoni con cui accedere alle impostazioni dello stesso. Uno di questi è il bottone “permessi”, che dà accesso ad un pannello simile a quello visto per le schede. I permessi di accesso sono definiti per singolo contenitore, infatti è possibile che un utente possa avere accesso ad una scheda, ma non a tutti i contenitori presenti dentro di essa.

Il bottone “modifica”, situato sul lato destro dell'elemento contenitore e accanto al bottone “permessi”, ci porta invece alla pagina in cui caricare allegati per il contenitore. In cima alla pagina è presente un ampio rettangolo grigio, cliccando il quale aprirà una finestra di dialogo standard in cui selezionare i file da caricare come allegati. Alternativamente, usando il metodo drag & drop del sistema operativo si possono trascinare e rilasciare i file desiderati nel rettangolo grigio. Una volta caricati, i file compariranno nello spazio sottostante, rappresentati come una serie di rettangoli affiancati, ciascuno di colore differente in base al tipo di file, che riportano al loro interno il nome dell'allegato e, nel caso il file sia un'immagine, un piccolo riquadro con una miniatura che fa da anteprima. Cliccando sulla parte alta del rettangolo e trascinando con il mouse è possibile spostare il file all'interno di questo spazio, per cambiare l'ordine in cui questi verranno mostrati all'interno del contenitore. Una piccola “X” in alto a destra permette di eliminare l'allegato, mentre cliccando sul nome del file si aprirà un popup in cui digitare un nome differente per l'allegato. Se il file allegato è di tipo immagine, cliccare sulla miniatura nel riquadro aprirà una piccola finestra popup contenente un'anteprima dell'immagine.

3.2.2.2.2. Gestione mappe

La pagina di gestione mappe presenta una lista simile a quella della pagina di gestione schede, ma con strumenti aggiuntivi in corrispondenza di ogni elemento mappa.

Si può creare una mappa cliccando sul bottone “nuova mappa” in alto al centro. La proprietà “abilitata” è analoga alla proprietà con lo stesso nome delle schede: una mappa non abilitata è accessibile nel backoffice ma è del tutto invisibile nel client. Ci sono poi un campo in cui inserire il nome della mappa, e un campo opzionale in cui inserire una descrizione. L'opzione “visibile in elenco mappe” permette di nascondere una mappa dall'elenco nel client. Questo può servire in caso si voglia creare una mappa secondaria che sia accessibile solo tramite il

Il “sistema urbano”

collegamento ad un'altra mappa a cui è correlata. A seguire, nel campo “centro della mappa” vanno inserite le coordinate di longitudine e latitudine, separate da virgola, della posizione geografica di partenza a cui puntare quando si apre la mappa, e il valore “zoom della mappa” indica il livello di zoom di partenza, con 1 corrispondente alla visuale più ampia possibile e 25 come posizione più vicina al suolo. Infine, le ultime tre opzioni permettono rispettivamente di attivare una griglia sovrainpressa sulla mappa, di mostrare un indicatore del livello di scala nell'angolo, e di permettere il controllo dello zoom sulla mappa usando lo scorrimento della rotella del mouse.

Premendo il bottone “mappe base”, presente sulla destra rispetto al nome della mappa interessata, accederemo ad una lista delle mappe base, ovvero le carte geografiche che possono fare “da sfondo” ad una mappa di IQ System. Si aggiunge un mappa base cliccando su “aggiungi mappa base”. Si può rinominare l'elemento appena creato o spostarlo all'interno della lista come si farebbe con un contenitore di una scheda, premendo il bottoni “modifica” sulla destra si può invece accedere alle sue proprietà. L'opzione “Visibilità livello” definisce se questa mappa base dev'essere selezionata di default quando la mappa a cui appartiene viene caricata. Nel campo “parametri mappa base” vanno inserite, seguendo la sintassi specifica del plugin OpenLayers, le istruzioni relative al tipo di carta geografica da usare.

Anche per le mappe base è disponibile uno strumento “permessi”, che apre a schermo la finestra popup dei permessi di accesso e funziona in maniera del tutto simile a quanto visto con i contenitori: un utente che non è abilitato ad usare questa mappa base non la vedrà tra quelle disponibili quando accede alla mappa dal client.

Accanto al bottone “mappe base”, nella pagina di gestione mappe, c'è il bottone “livelli interni”, che porta ad una schermata simile a quella dei contenitori delle schede. Ogni elemento elencato in questa pagina corrisponde ad una cartella/categoria che troveremo nel client, all'interno del pannello “livelli” della mappa. I livelli in questa pagina possono essere creati, eliminati, spostati e resi visibili a specifici utenti, usando le stesse procedure con cui agiremmo su un contenitore di una scheda DataSystem. Premendo il tasto “modifica” sul lato destro di un livello si accede alla schermata di caricamento allegati, anche questa analoga a quella in cui si caricherebbero allegati per una scheda: nell'area grigia in alto vanno trascinati i file raster (come immagini jpg o png) o i file contenenti le geometrie vettoriali, che verranno poi visualizzati nello spazio sottostante una volta terminato il caricamento. Ognuno di questi allegati verrà mostrato nel lato client come un layer, contenente elementi grafici posizionati

in specifiche coordinate della mappa. Premendo il bottone “attributi”, presente sul rettangolo corrispondente ad un allegato, si raggiunge la schermata delle proprietà del layer. L’opzione “visibilità layer” serve ad impostare il layer come attivo o disattivo di default, all’apertura della mappa. Nel campo “colore legenda” possiamo inserire il valore esadecimale di un colore, oppure scegliere un colore dal pannello che compare dopo aver premuto il bottone all’estremità del campo. Questo colore verrà utilizzato per colorare un piccolo marker a sinistra del nome del layer, nel pannello livelli, utile per farlo risaltare all’interno di una lunga lista. Il valore Z-index serve invece a definire l’ordine di disegno a schermo del layer rispetto agli altri: un valore più alto farà in modo che il layer venga disegnato “sopra” agli altri che hanno un valore minore. I campi successivi vengono utilizzati in caso l’allegato sia un disegno vettoriale: impostando “renderizza con lo stile interno del livello” su “no” sarà possibile utilizzare i campi sottostanti per definire dei valori di colore e spessore personalizzati per tracciare il layer, altrimenti verranno utilizzati i valori impliciti presenti nell’allegato. Infine, il campo “coordinate extent” sarà utilizzato solo per gli allegati di tipo raster. In questo campo devono essere inseriti quattro valori, separati da virgola, corrispondenti alle coordinate geografiche dei quattro lati dell’immagine, definendone posizione ed estensione.

L’ultimo strumento mappa disponibile, accessibile con un altro dei bottoni presenti sulla destra di ogni elemento nella pagina di gestione mappe, è l’“Albero livelli”. Accedendo a questo strumento verremo portati in una pagina in cui si definiscono le mappe a cui la mappa corrente è collegata, che compariranno quando si selezionerà “elenco mappe” dal pannello a destra della vista mappa del client. Si aggiunge un elemento, usando il tasto “aggiungi ramo”, per ogni mappa che dev’essere collegata. Dopo aver aggiunto il ramo e aver impostato i relativi permessi di accesso, si seleziona “modifica”. Qui, in corrispondenza di “mappa collegata”, bisogna selezionare dal menu a tendina la mappa che si intende collegare usando questo ramo.

3.2.2.2.3. Gestione VR

La lista in questa pagina elenca tutte le applicazioni VR registrate. Premendo “nuovo VR” è possibile registrare una nuova applicazione. L’opzione “VR abilitato” serve a rendere il collegamento all’applicazione visibile dal contenitore client. Va poi inserito un titolo per il

Il “sistema urbano”

VR e il percorso per accedere al file eseguibile dell'applicazione, relativo alla directory dell'applicazione client IQ.

3.2.2.2.4. Gestione utenti

Nel pannello a sinistra di qualsiasi pagina del backoffice, sotto la sezione “moduli attivi”, si trova l'accesso alla pagina di gestione utenti, dove registrare, eliminare, o modificare i parametri di ciascun profilo personale a cui si vuole garantire l'utilizzo di IQ System.

Premendo il bottone “nuovo utente” in cima alla pagina si registra un nuovo profilo. I campi in questa pagina vanno compilati con i dati dell'utente, inclusi un nome utente ed una password scelti a piacimento, che saranno da lì in poi usati per l'autenticazione. Una volta salvati i dati utente, è necessario cercare il profilo nella lista utenti e premere il bottone “modifica” corrispondente, per accedere alle impostazioni rimanenti. In questa pagina è possibile modificare alcuni dei valori inseriti nel form precedente, ma soprattutto è possibile garantire l'accesso all'applicazione client e al backoffice, e anche stabilire il livello di utenza backoffice. Impostando il livello più opportuno si può limitare la capacità di un utente di creare, modificare, o eliminare contenuti presenti nel database IQ tramite la piattaforma backoffice, per proteggere i dati registrati da manomissioni dolose.

Per modificare la password di un utente è sufficiente premere il bottone “password” relativo a quell'utente e digitare la nuova parola chiave.

3.2.2.3. Plugin e tecnologie di terze parti

IQ System riesce a fornire servizi e funzionalità avanzate tramite l'integrazione di diversi plugin e librerie opensource, tra i quali i seguenti:

- OpenLayers – libreria per la visualizzazione su pagine web di carte geografiche, arricchite da elementi dinamici georeferiti.
- MySQL – database management system, utilizzato per il mantenimento della base di dati su cui risiedono i contenuti di IQ System.
- Three.js – libreria per la gestione di scene virtuali tridimensionali su pagine web tramite WebGL.
- Potree – libreria per la renderizzazione di nuvole di punti all'interno di pagine web.
- Chromium Embedded Framework – libreria per l'embedding di web browser in applicazioni native.

Lo sviluppo, la manutenzione e l'utilizzo dei sottosistemi di IQ è reso possibile anche dall'uso dei seguenti tool e framework:

- Visual Studio – ambiente di sviluppo integrato per la produzione di applicazioni desktop. Utilizzato per lo sviluppo dell’applicazione client di IQ System, scritta in linguaggio C# e con l’utilizzo della libreria winforms per le interfacce utente. Utilizzato anche per lo sviluppo di IQ tools, con la libreria d’interfaccia utente WPF.
- IQ tools – programma utility per la preparazione dei dati prima dell’inserimento nella piattaforma backoffice.
- CefSharp – wrapper per l’integrazione il Chromium Embedded Framework nell’ambiente C#.
- QGIS – applicazione GIS desktop, utilizzata per la preparazione e la gestione delle entità geospaziali e relativi attributi da caricare sulla piattaforma backoffice,

3.3. Casi studio

Come anticipato la piattaforma descritta nel paragrafo precedente è il prodotto di un lungo percorso di sviluppo che si estende oltre il percorso di ricerca di questo dottorato, sia dal punto di vista temporale che dal punto di vista delle competenze.

Attraverso i casi studio di questo paragrafo verranno quindi trattati gli aspetti che, nel corso del presente dottorato, sono stati approfonditi con l'obiettivo di implementare e migliorare la piattaforma nell'ottica della rappresentazione e del rilievo dell'architettura storica.

3.3.1. Ascoli Piceno

Il centro storico di Ascoli Piceno è stato uno dei primi casi studio per l'implementazione della piattaforma in tutti i suoi ambiti.

Complice l'ubicazione della sede dell'azienda (all'interno del quale si è svolto il dottorato) nel Comune stesso, le campagne di rilievo si sono svolte nel corso di molteplici riprese, in alcuni casi anche con un intervallo temporale parecchio ampio l'una dall'altro.

L'uso della piattaforma e l'implementazione di questa grande mole di dati è stata quindi l'occasione per organizzare e gestire i risultati di queste campagne.

Gli strumenti utilizzati spaziano dalla topografia alle più moderne tecnologie di rilievo 3D: GPS (Global Positioning System), TLS (Terrestrial Laser Scanning Scanner) fissi e mobili, fotogrammetria da drone, georadar, termocamere. (Figura 11)



Figura 11 – Ascoli Piceno. Strumenti utilizzati nelle acquisizioni del centro storico della città

Per dare un' indicazione dell' estensione del rilievo si riporta il tracciato percorso dal sistema integrato Pegasus: two + Stream EM. (Figura 12)

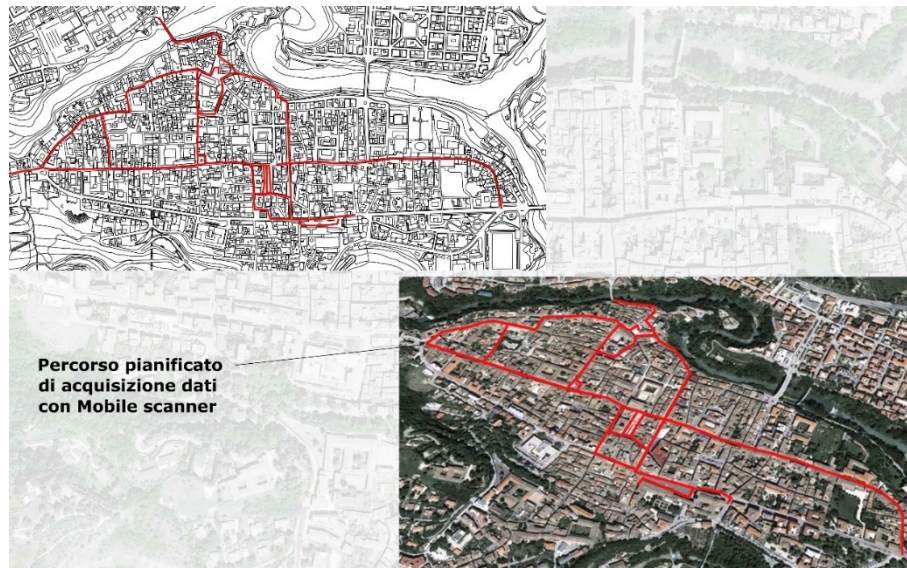


Figura 12 – Ascoli Piceno. Percorso di rilievo del sistema integrato Pegasus Two + Stream EM

Il “sistema urbano”

Il sistema integrato tra il Laser Scanner Mobile e un sistema di antenne GPR (ground penetrating radar) montato su un carrello mobile (che può essere trainato manualmente o da un autoveicolo, come nel caso in esame) permette l'acquisizione simultanea dello spazio al di sopra del piano di calpestio e dell'ambiente del sottosuolo.

Il ricevitore GNSS (global navigation satellite system) e la piattaforma IMU (inertial measurement unit) permettono inoltre la georeferenziazione dell'intero sistema acquisito.

In questo caso studio sono stati due gli apporti testati e calibrati al fine del miglioramento della piattaforma nell'ottica della fruizione e della rappresentazione del rilievo:

- Implementazione di uno strumento che permetta di visualizzare parti della nuvola di punti e di ottenerne misure, all'interno della piattaforma stessa;
- Test e sviluppo di uno strumento in grado di riconoscere lesioni da fotografie.

3.3.1.1. Visualizzazione e misurazione della nuvola di punti

Il primo obiettivo raggiunto di aver reso accessibile e di aver organizzato i dati di rilievo in una struttura gerarchicamente organizzata, seppure rappresentasse un importante ed utile strumento, non permetteva di compiere operazioni direttamente scelte dall'utente sulla nuvola di punti.

Ci si è quindi posti l'obiettivo di rendere quanto più “navigabile” l'oggetto nuvola di punti all'interno della piattaforma e al contempo di poterne ottenere dati geometrici diretti.

Per ottenere questo risultato il primo passo è stato quello dell'implementazione nella piattaforma di Potree: visualizzatore di nuvole di punti di grandi dimensioni basato su WebGL open source (Schütz, 2016).

All'interno della piattaforma aprendo la nuvola di punti il layout si costituisce di tre parti: a sinistra un estratto dell'ortofoto con identificato l'oggetto selezionato che si sta navigando, al centro la nuvola di punti e a destra la barra dei comandi che permette di utilizzare gli strumenti implementati, così come descritti in Figura 13.

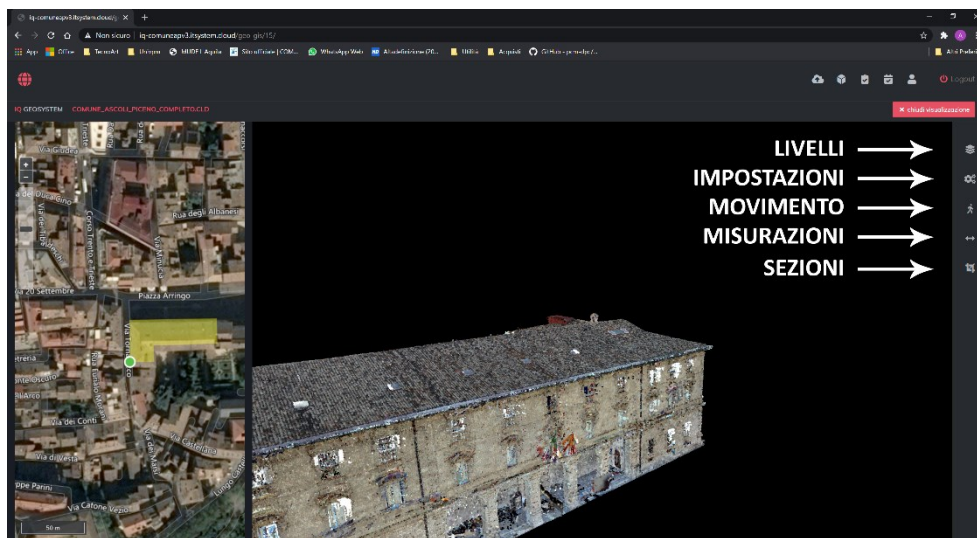


Figura 13 – Piattaforma: layout

Le operazioni di visualizzazione della nuvola sono contenute nel pannello “Sezioni”. Aprendo questo pannello è possibile aggiungere uno o più “box” ancorando questi ad un punto appartenente alla nuvola. È possibile così delimitare un volume, sia manualmente (attraverso le maniglie di spostamento e rotazione) che analiticamente (inserendo posizione e dimensioni del box nella parte inferiore del pannello sezioni), che evidenzierà i punti della nuvola insistenti all’interno del volume. (Figura 14)

Il “sistema urbano”

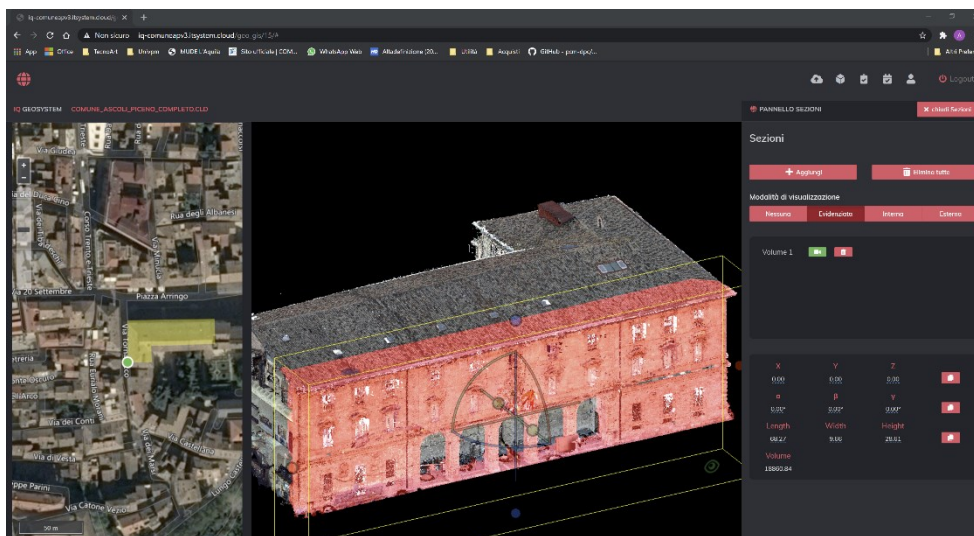


Figura 14 – Piattaforma / Pannello sezioni

Una volta evidenziato il volume di interesse è possibile attivare due diverse visualizzazioni della nuvola in funzione del box fissato: vista “interna” e vista “esterna”.

La vista “interna” renderà visibili esclusivamente i punti contenuti all’interno del box (Figura 15), mentre quella “esterna” nasconderà i punti all’interno del box, lasciando visibili tutti gli altri punti della nuvola (Figura 16).

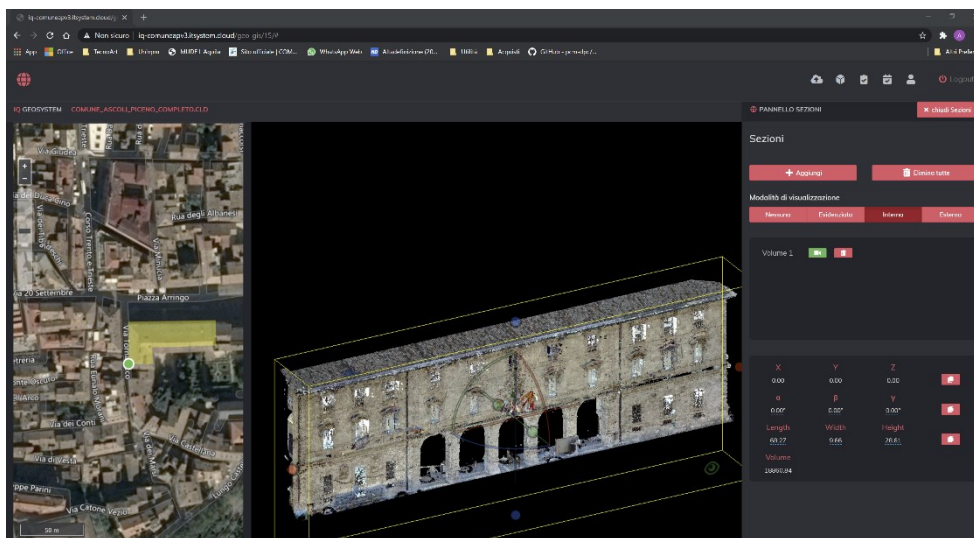


Figura 15 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna

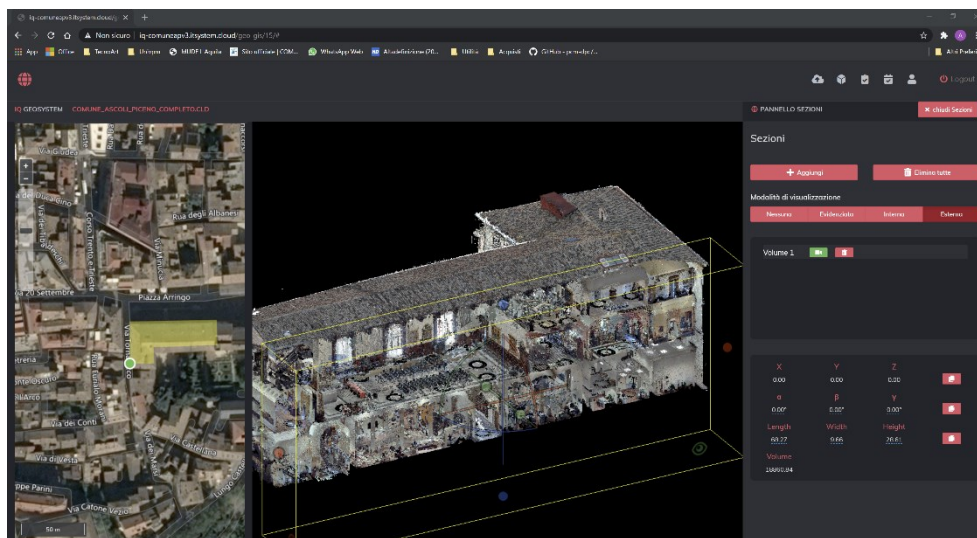


Figura 16 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista esterna

Questo strumento permette così di avere una visione completa sfruttando tutte le varie combinazioni di posizionamento, dimensionamento e orientamento del box.

Una possibile declinazione altrettanto utile di questo strumento è l’ottenimento di “slices” impostando la profondità del “box” su valori prossimi a valori dei 5 cm, così come viene fatto nella maggior parte dei software di gestione di nuvole di punti. (Figura 17, Figura 18)

Il “sistema urbano”

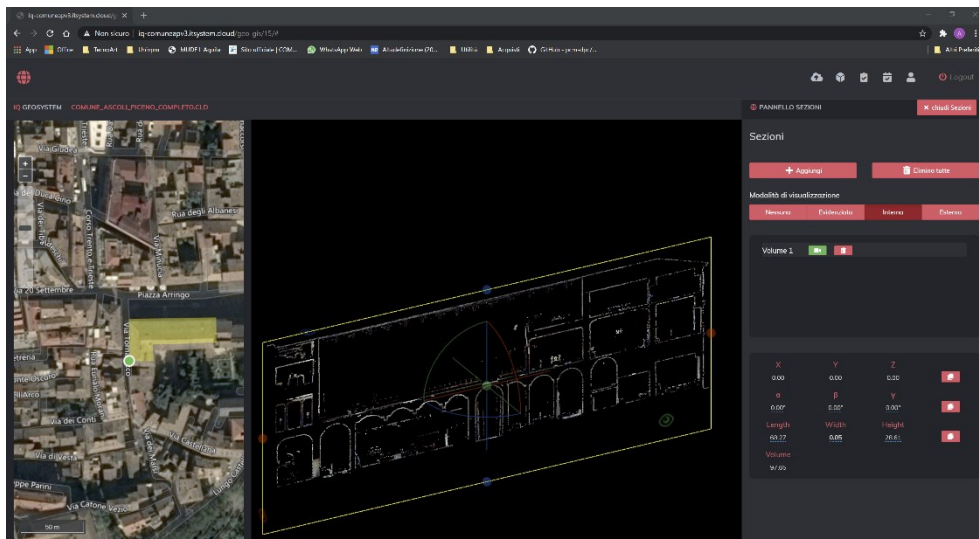


Figura 17 – Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna: slice verticale

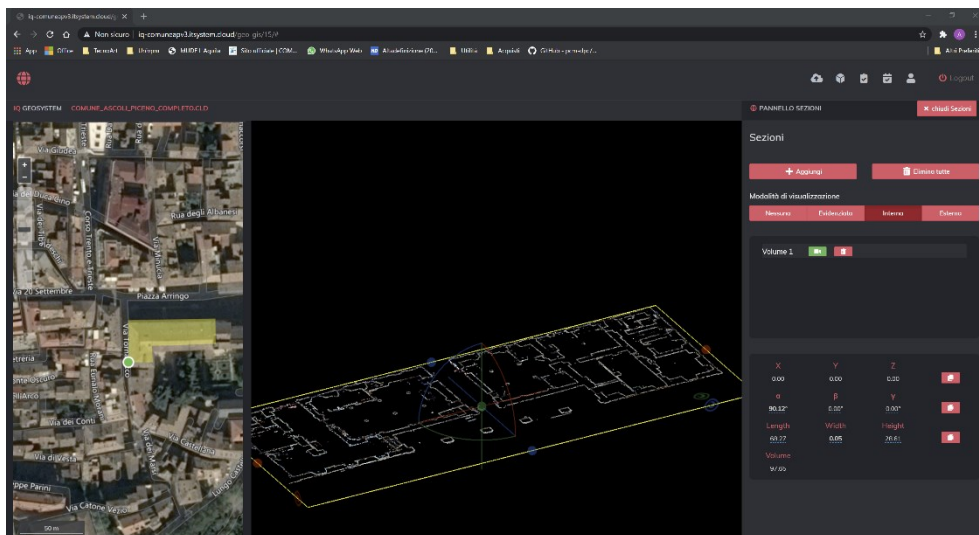


Figura 18-- Piattaforma / Pannello sezioni / vista interna: slice orizzontale

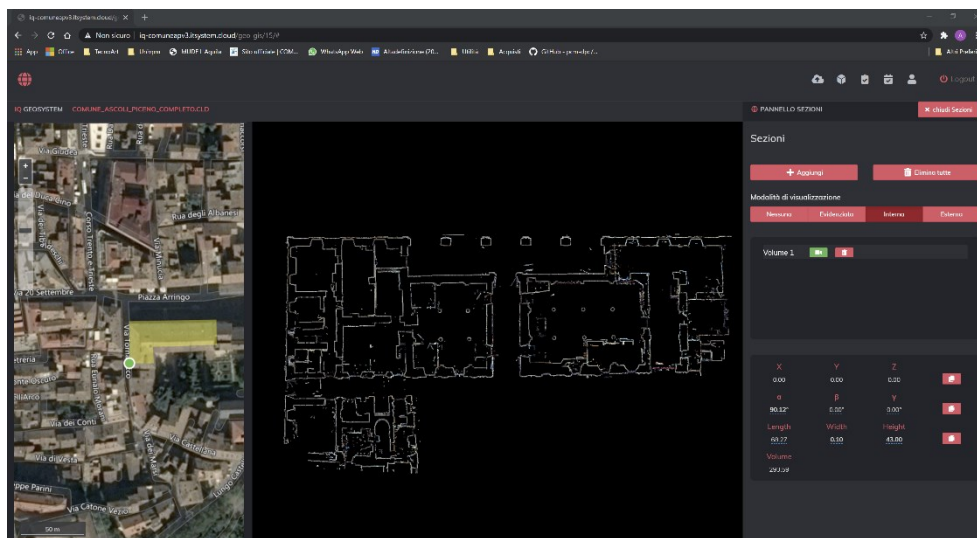


Figura 19 – Slice orizzontale con vista orientata sul piano del box della sezione

Individuata una sezione e allineata la vista al piano della sezione stessa (Figura 19) ci si è concentrati sulla possibilità di ottenere informazioni metriche direttamente in questo ambiente.

Per raggiungere tale obiettivo si è introdotto nella piattaforma il pannello “Misurazioni” che permette di ottenere le seguenti informazioni:

- Coordinata: restituisce le coordinate georeferenziate del punto della nuvola selezionato e la sua altezza sul livello del mare;
- Distanza: restituisce la misurazione della distanza nello spazio tra punti della nuvola selezionati consecutivamente;
- Altezza: restituisce la misurazione della componente verticale della distanza tra due punti della nuvola;
- Area: selezionati almeno tre punti restituisce la superficie inscritta nel poligono selezionato;
- Angolo: selezionati tre punti restituisce i valori degli angoli interni al triangolo descritto dai tre punti.

Il “sistema urbano”

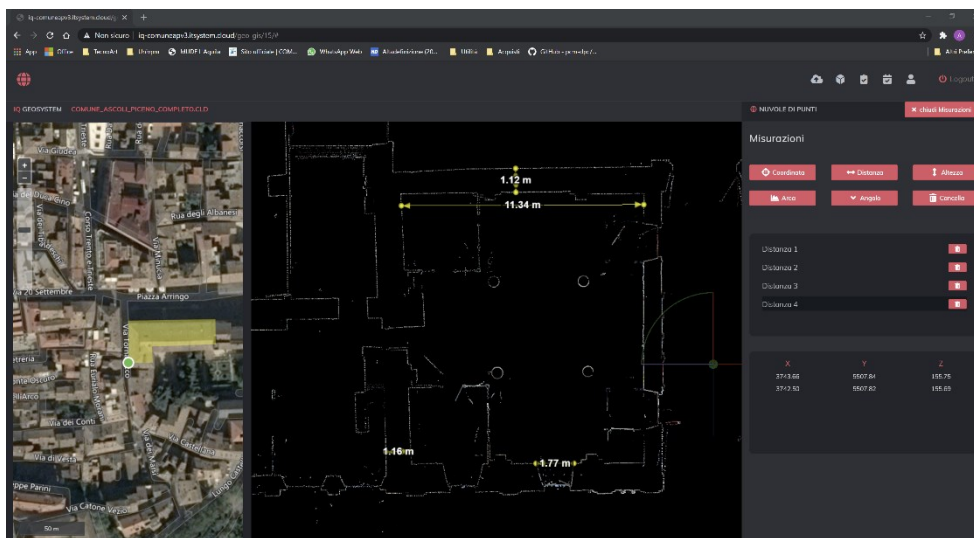


Figura 20 - Piattaforma / Pannello Misurazioni / Distanza

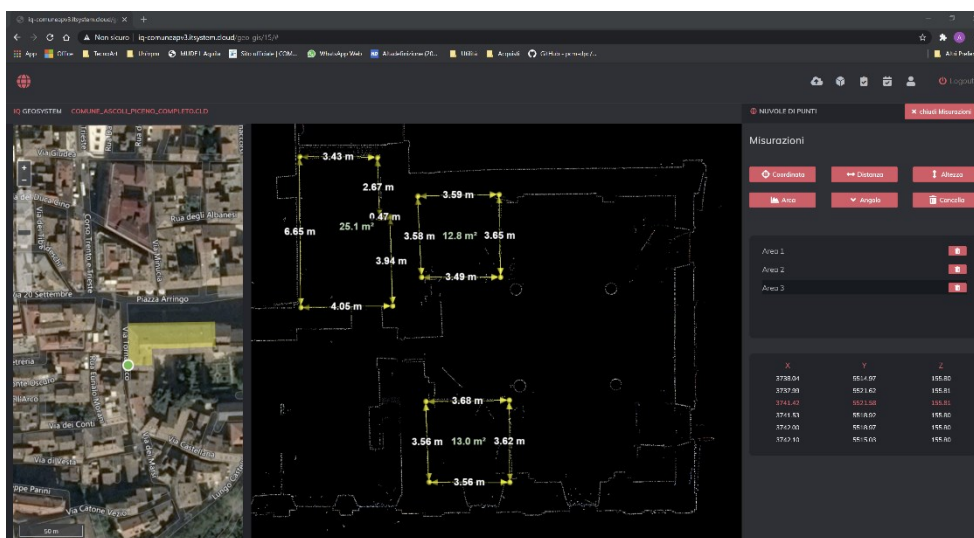


Figura 21 – Piattaforma / Pannello Misurazioni / Area

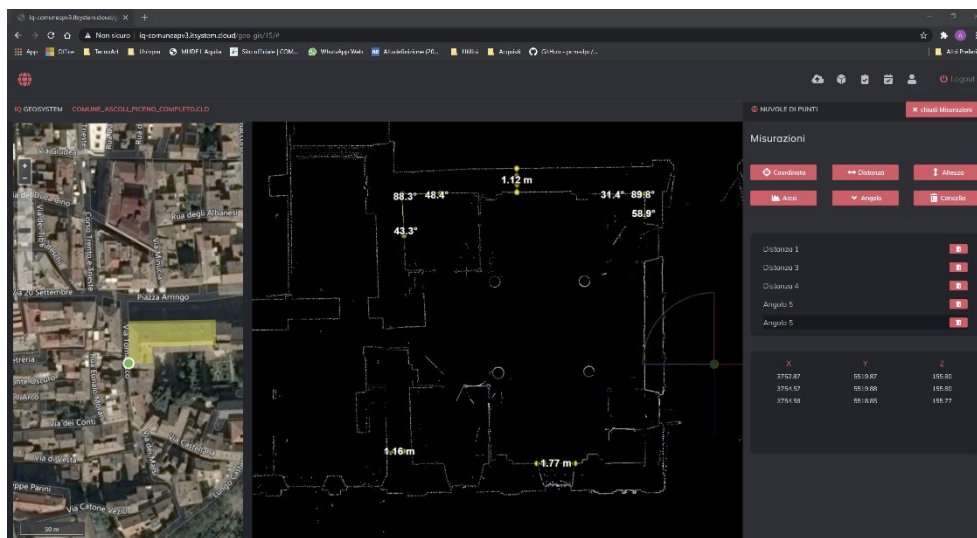


Figura 22 – Piattaforma / Pannello Misurazioni / Angolo

Questi strumenti di misurazione combinati alle possibilità offerte dal pannello Sezioni, sopra descritto, permettono di avere in tempo reale degli “elaborati tradizionali virtuali” con la possibilità di ottenere piante e sezioni in ogni punto dell’oggetto analizzato.

Tuttavia gli elaborati tradizionali sono alle volte imprescindibili, specie nel caso dell’architettura del Cultural Heritage dove l’interpretazione da parte dell’esperto risulta ancora insostituibile.

Per questi motivi sulla piattaforma sono stati collegati alla nuvola gli elaborati tradizionali, preventivamente realizzati, che è possibile richiamare attraverso la barra dei comandi laterali. In questa fase il Client (cfr Paragrafo 3.2.2.1) non può esportare dati della nuvola con il fine di realizzare nuovi elaborati tradizionali: ha accesso libero alla visualizzazione e misurazione della nuvola, con tutte le possibilità descritte, e anche agli elaborati canonici che sono stati caricati come file *.pdf o anche *.dxf, ma una eventuale slice individuata tramite il comando di sezione non potrebbe essere utilizzata/esportata in alcun modo in un ambiente cad per permettere la realizzazione di un nuovo elaborato.

Superare questo limite è l’obiettivo che ci si è posti nel caso studio che verrà affrontato più avanti.

3.3.1.2. Test di uno strumento in grado di riconoscere lesioni da fotografie

Un'ulteriore approfondimento nell'ambito del presente caso studio è testato l'utilizzo e la sperimentazione di un applicativo che ha l'obiettivo di riconoscere delle aree soggette a danneggiamento come, ad esempio, fessure e crepe.

Originariamente il software è stato creato per il riconoscimento di lesioni in ambito infrastrutturale (su ponti, viadotti ecc.) e nel presente caso studio si è cercato di valutare quanto questa applicazione sia performante nel campo degli edifici civili e del patrimonio storico architettonico.

Il funzionamento del software è basato sull'uso del Machine Learning.

Attraverso l'analisi di centinaia di foto si è stato addestrato il software: la difficoltà più grande da superare è imputabile alla forma della lesione, che non può essere identificata in una forma standard e ripetitiva. Tuttavia, quanto più numerose analisi sono state fatte fare, maggiore è stata la precisione con cui le fessure sono state riconosciute.

Al fine di testare quale fosse il framework che più si adattasse a questa esigenza è stato effettuato un benchmark su diversi framework di Machine Learning. In particolare sono stati sperimentati il Microsoft Vision e OpenCV.

Dal punto di vista dei risultati i due framework sono sostanzialmente equiparabili, senza un'apprezzabile differenza tra i due. Pur risultando più agevole la fase di “addestramento” in Microsoft, alla fine si è optato per l'implementazione di OpenCV per la sua natura Open Source.

Dal punto di vista dell'interfaccia grafica lo strumento è molto semplice: nella barra a destra è possibile selezionare il percorso URL dell'immagine da analizzare o in alternativa scegliere il percorso locale. L'unico parametro che si può scegliere è il numero di iterazioni del processo: più alto sarà questo valore maggiore sarà la probabilità di accuratezza del risultato, con un conseguente aumento dei tempi di calcolo (che rimangono comunque molto limitati, nell'ordine di qualche secondo). (Figura 23)

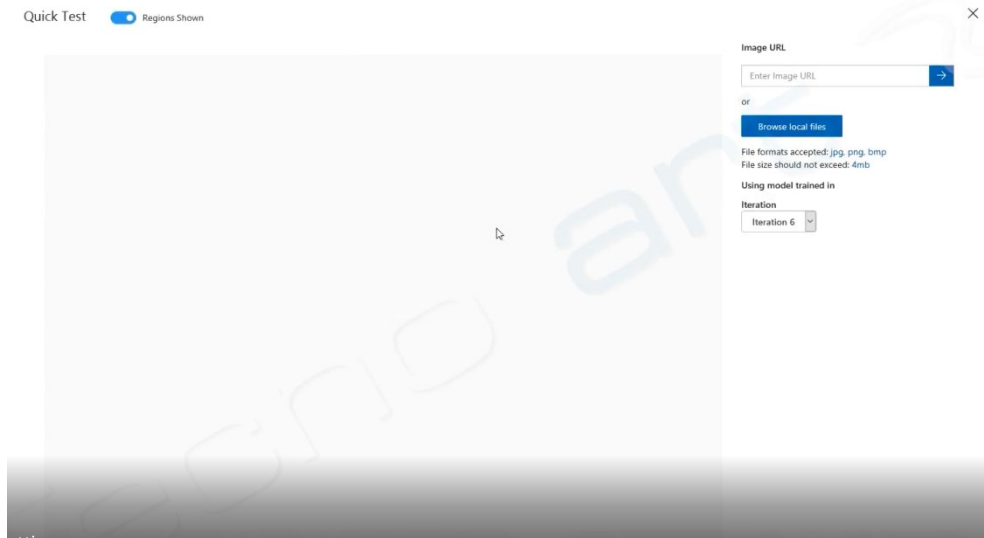


Figura 23 – Tool lesioni: schermata di input

Al termine del calcolo il software restituisce l’immagine caricata con le eventuali lesioni riconosciute evidenziate da un rettangolo in cui la lesione è inscritta. Sulla destra per ciascuna probabile lesione riconosciuta viene inoltre fornita una percentuale di probabilità.

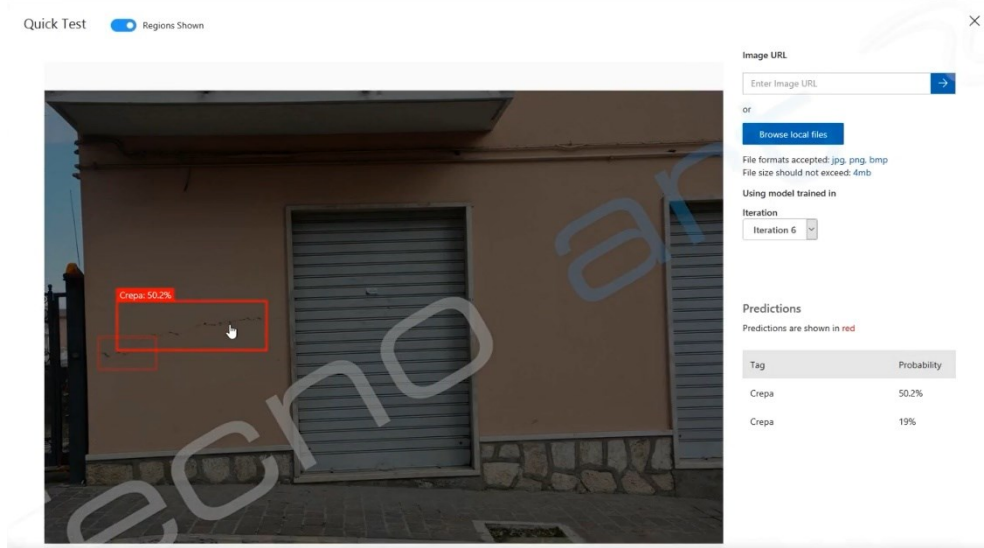


Figura 24 – Tool lesioni: schermata di output

Il “sistema urbano”

Questo strumento, ancora in fase sperimentale, per ora è inserito all'interno della piattaforma esclusivamente come strumento di interrogazione che permette di individuare la presenza di lesioni esclusivamente in termini qualitativi.

Un possibile upgrade di tale strumento potrebbe essere quello dell'automazione del disegno della lesione riscontrata attraverso elementi vettoriali (polilinee sostanzialmente). Questo strumento potrebbe essere utile nel caso di analisi di fotopiani di prospetti o sezioni.

Un altro sviluppo di questo software, che è stato parzialmente sviluppato nel campo infrastrutturale, è l'utilizzo con fini di monitoraggio di strutture esistenti.

In questa ottica è stato ampliato il software di riconoscimento delle lesioni che permette di analizzare due foto che inquadrano la stessa scena in tempi diversi. Siamo quindi nella condizione di una camera fissa che inquadra una scena prestabilita.

Il software analizza ed evidenzia i danni calcolando eventuali scostamenti tra una foto e l'altra (Figura 25).

In questo caso sono stati implementati una serie di algoritmi inferenziali che sono in grado di comprendere le differenze tra una foto e l'altra e mostrare e misurare tutte le fasi dei cambiamenti, siano essi degli spostamenti o danni da deterioramento.

Applicando questa analisi tra fotogrammi successivi, registrati ad un intervallo di tempo prestabilito, sarà possibile avere un monitoraggio in tempo reale a basso costo.

In questo caso la piattaforma potrebbe garantire accesso alle stazioni di controllo georiferite (camere collegate in rete sostanzialmente) con la possibilità di inserire soglie limite per spostamenti e/o modifiche dello stato di fatto della struttura, al superamento delle quali automaticamente potrebbe essere collegato l'invio di un segnale di allerta.

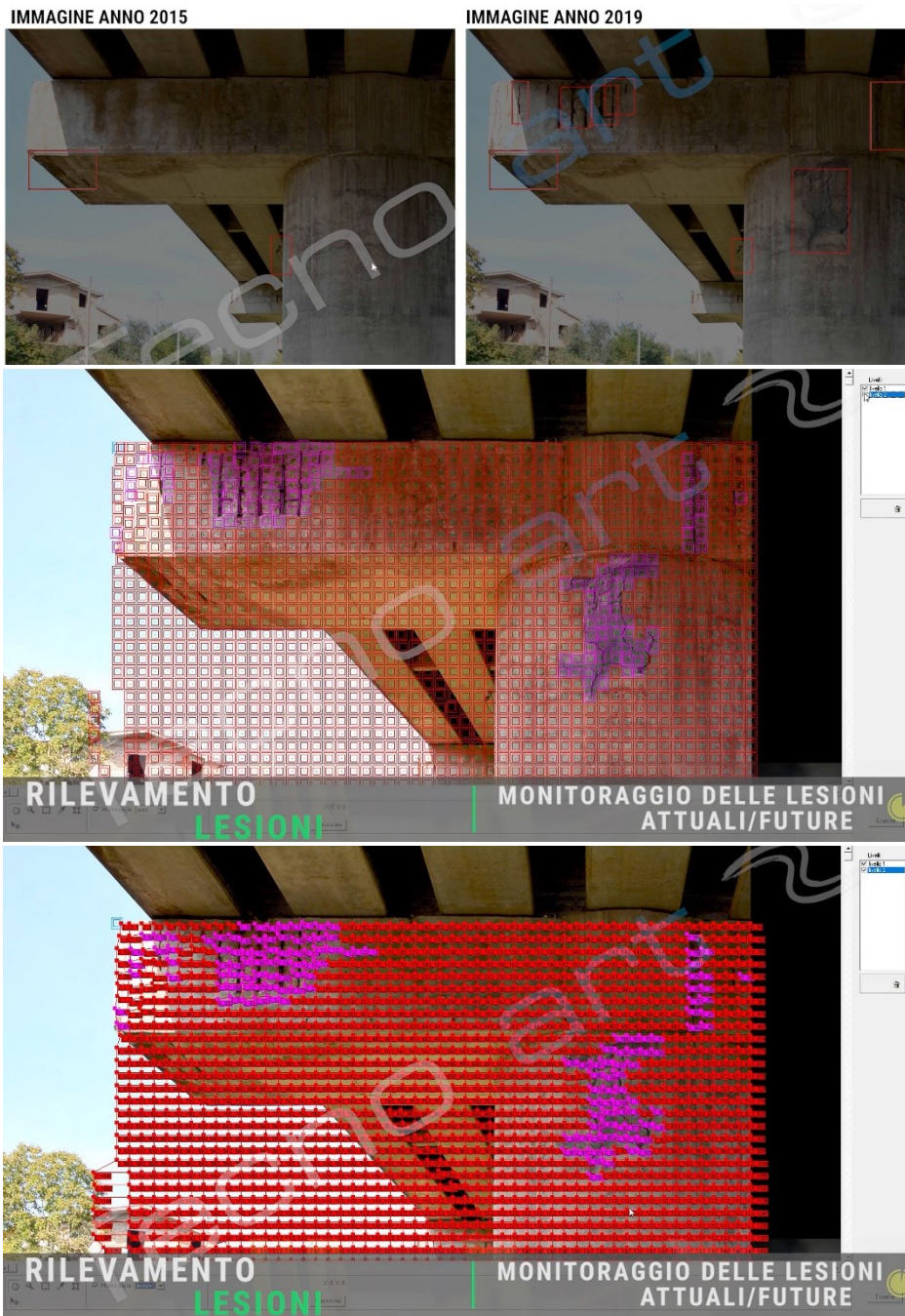


Figura 25 – Tool lesioni: riconoscimento tra lesioni ante-post

3.3.2. Venezia

3.3.2.1. La campagna di rilievo

L’acquisizione di parte dell’isola di Venezia fa parte di una commissione che prevedeva il rilievo di alcuni canali della laguna. In particolare era richiesto il rilievo sia dei fronti dei palazzi che si affacciavano sui canali, sia il rilievo del fondale dei canali stessi.

La campagna di rilievo si è svolta percorrendo i rii e canali del centro storico di Venezia utilizzando una imbarcazione appositamente equipaggiata con un MMS (Mobile Mapping System) Pegasus Two Ultimate della Leica Geosystems e di un sistema Multibeam Echosounder SeaBat T50-P della Teledyne Reson, entrambi installati su una patana, tipica imbarcazione veneziana nata per l'utilizzo nella laguna veneta caratterizzata da un fondo piatto che le consente di navigare fondali particolarmente bassi. (Figura 26)

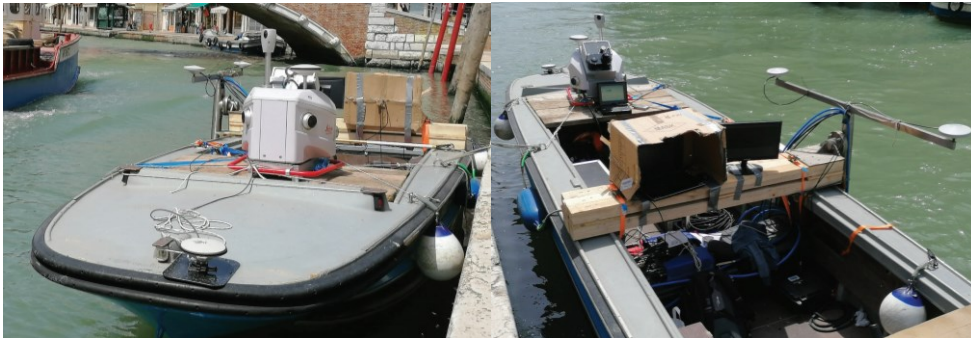


Figura 26 – Venezia. Strumentazione usata per il rilievo installata sull'imbarcazione

Il mobile mapping consente di mappare rapidamente strade, infrastrutture ed edifici (in quanto caso anche canali e rii) attraverso una piattaforma ad alto contenuto tecnologico dotata di sensori laser scanner e camere digitali, installata su veicolo mobile. Fra questi sensori i più importanti sono i ricevitori GPS e la piattaforma inerziale che permette di elaborare e correggere in tempo reale tutti gli spostamenti del veicolo/natante che trasporta il sistema MMS.

Il sistema è in grado di viaggiare su qualsiasi infrastruttura, catturando con estremo dettaglio ogni elemento presente lungo il “corridoio” oggetto del rilievo, consentendo l’acquisizione di immagini e filmati e la produzione di modelli tridimensionali estremamente accurati per la progettazione, manutenzione e documentazione. Esso è il risultato dell’integrazione di

varie tecnologie: laser scanner o profilometro da 200hz, sistema inerziale (IMU), antenne GPS (Global Positioning System), telecamere fotogrammetriche e odometro elettronico.

I punti rilevati dal laser scanner vengono proiettati nello spazio tramite il gps ed orientati attraverso il sistema inerziale. Il risultato è una nuvola di punti direttamente georeferita in coordinate WGS84.

L'unità di misurazione inerziale consta di accelerometri e giroscopi che misurano l'accelerazione e la velocità angolare del veicolo, necessarie per il calcolo di tutti i parametri descrittivi del movimento (inclusi la posizione, la velocità e l'accelerazione, l'orientamento e la rotazione). Tali misurazioni permettono di ricostruire con precisione la traiettoria del veicolo riducendo gli errori di rilievo.

Il Multibeam consente di valutare in modo estremamente accurato le caratteristiche del fondale restituendo una rappresentazione ad alta risoluzione della morfologia del fondale stesso unito ai dati batimetrici reali senza estrapolazioni.

I dati acquisiti vengono elaborati e restituiti in un modello tridimensionale costituito dall'unione di punti tutti georeferenziati.

Il sistema combinato laser scanner mobile e sonar multibeam ha permesso il rilievo contemporaneo di tutto quanto presente sopra e sotto il pelo dell'acqua consentendo di ottenere una nuvola di punti che rappresentasse sia i fondali dei rii e dei canali che gli edifici che si affacciano sui canali stessi.

Sono stati rilevati circa 45 km, in sviluppo lineare, di rii e canali, navigando per circa 105 km. Gli unici tratti non rilevati sono stati quelli che per larghezza non consentivano l'accesso all'imbarcazione e quelli inaccessibili a causa della presenza di ponti di un'altezza particolarmente bassa tale da impedirne il passaggio al di sotto della strumentazione. (Figura 27)

Il “sistema urbano”



Figura 27 – Venezia. Tracciato percorso dall'imbarcazione con strumentazione MMS e Multibeam

Tramite l'utilizzo del software proprietario Leica le passate effettuate con il mobile scanner sono state elaborate al fine di eliminare le oscillazioni dovute al rollio e beccheggio ed ottenere una nuvola di punti che fosse perfettamente rispondente ai luoghi. Le scansioni mobili sono state unite in un unico sistema di riferimento cartesiano attraverso il riconoscimento di punti di controllo (GCP) rilevati sulle pavimentazioni e sugli edifici, si è così costituito un modello a nuvola di punti globale della parte sopra il pelo dell'acqua rappresentante l'edificato del centro storico di Venezia che si affaccia su rii e canali.

Così come per le scansioni sopra il pelo dell'acqua anche per quanto riguarda il rilievo dei fondali si sono utilizzati appositi software per la post elaborazione del dato. La Tecnologia multibeam M.B.E.S. (Multi Beam Eco Sounding) è molto sofisticata e capace di fornire altissimi standard quantitativi e qualitativi delle informazioni prodotte. Con questa strumentazione si effettua un'acquisizione continua che utilizza un numero elevato di beam contemporaneamente, coprendo una ampia fascia di fondale.

La risoluzione è elevatissima e permette di identificare strutture del fondale anche di ridotte dimensioni. Anche in questo caso, la navigazione viene assistita da un GPS di precisione in modalità RTK. Inoltre, per garantire l'accuratezza potenziale dello strumento, sono necessari

i sensori di moto per la compensazione del rollio e beccheggio. Opportune calibrazioni permettono inoltre la correzione dei dati acquisiti.

Questo tipo di acquisizione permette di conoscere con maggior precisione la reale morfologia del fondale con le rispettive quote batimetriche, rilevate per misura diretta.

Per particolari applicazioni, come in questo caso, il trasduttore MultiBeam può essere montato in modalità inclinata lateralmente, così da permettere oltre al rilievo del fondale quello, ad esempio, delle pareti degli edifici che si affacciano sui rii e canali, delle banchine portuali e della scarpata delle opere di difesa dal piede delle medesime fino alla superficie dell'acqua.

Le elaborazioni dei dati provenienti dal sistema Mobile scanner e dal sistema sonar Multibeam hanno permesso la loro unione e gestione in un unico sistema di coordinate producendo una unica nuvola di punti che rappresentasse quanto presente sopra e sotto il pelo dell'acqua.

3.3.2.2. Le novità introdotte: lo strumento profilo e la possibilità di importazione/esportazione *.dxf

L'inserimento dei dati di rilievo derivati da queste campagne di acquisizioni nella piattaforma ha rappresentato l'occasione per approfondire il tema dell'utilizzo diretto della nuvola sia all'interno della piattaforma stessa, sia con la possibilità di esportare dati ricavati dalla nuvola.

Si è cercato, in altre parole, di dare seguito alle possibili implementazioni avanzate nelle conclusioni del paragrafo 3.3.1.1.

Gli esiti di questi sviluppi si sono concretizzati nell'introduzione di due nuove funzionalità nella barra dei comandi laterale della piattaforma (Figura 28)

Il “sistema urbano”

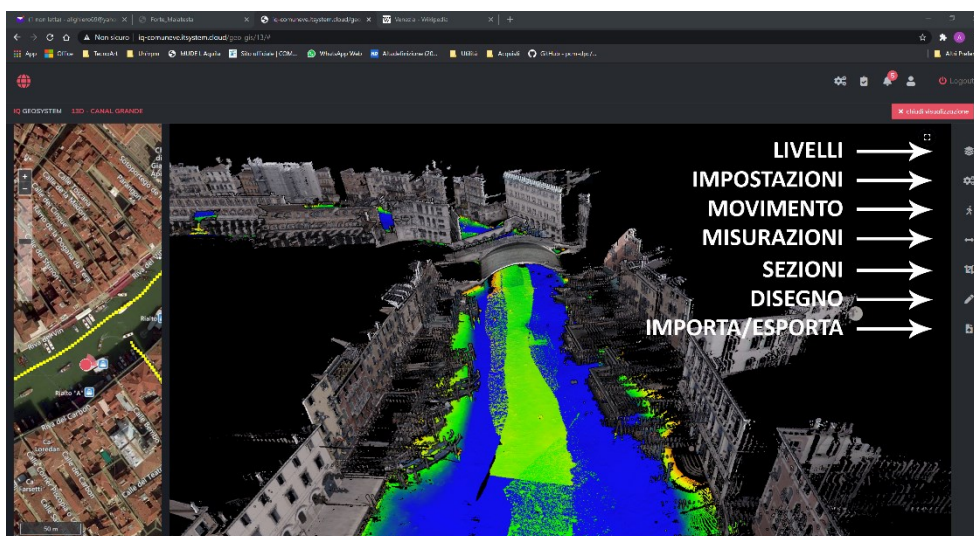


Figura 28 – Piattaforma: layout aggiornato

Le funzionalità “Disegno” e “Importa/Esporta” sono gli strumenti che permettono di ottenere ampie possibilità nello sfruttamento delle nuvole di punti visibili sulla piattaforma.

La prima novità introdotta è la presenza del pannello Disegno. Aprendo dalle toolbar laterale questo pannello si accede agli strumenti in esso contenuti: punto, polilinea e poligono permettono di disegnare sulla nuvola in 3D le relative primitive ancorandosi ai punti della nuvola di punti.

Questa funzione è sia accessibile nella vista assonometrica 3D, come visibile in Figura 29, ma anche attraverso un ulteriore pannello che può essere aperto tramite l’apposito pulsante contenuto nel pannello di Disegno, denominato “Apri pannello Profilo”.

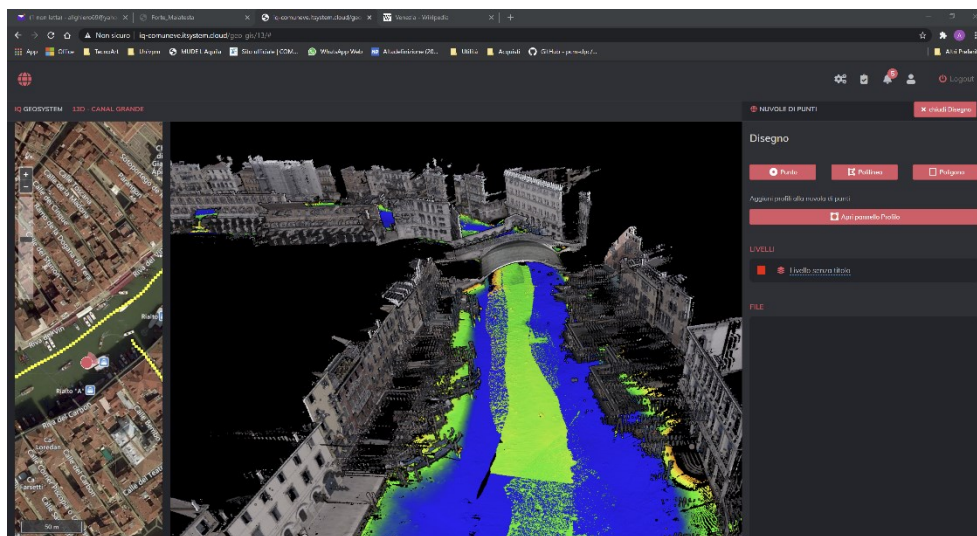


Figura 29 – Piattaforma / Pannello Disegno

Il comando “Apri pannello Profilo”, se selezionato, cambia il layout della piattaforma aggiungendo un nuovo riquadro sulla sinistra in cui sarà visualizzata una vista 2D del piano XZ del volume identificato dall’oggetto Profilo. (Figura 30)

Aggiungendo un profilo (tramite l’apposito comando sul pannello di destra) sarà possibile infatti inserire un box di selezione (molto simile al box del comando Sezione del paragrafo 3.3.1.1) con le seguenti caratteristiche: l’asse verticale Z sarà vincolato sull’asse Z del sistema di riferimento della nuvola, mentre la direzione dell’asse XY sarà scelta a discrezione dall’utente indicando due punti sulla nuvola. (Figura 31)

Il “sistema urbano”

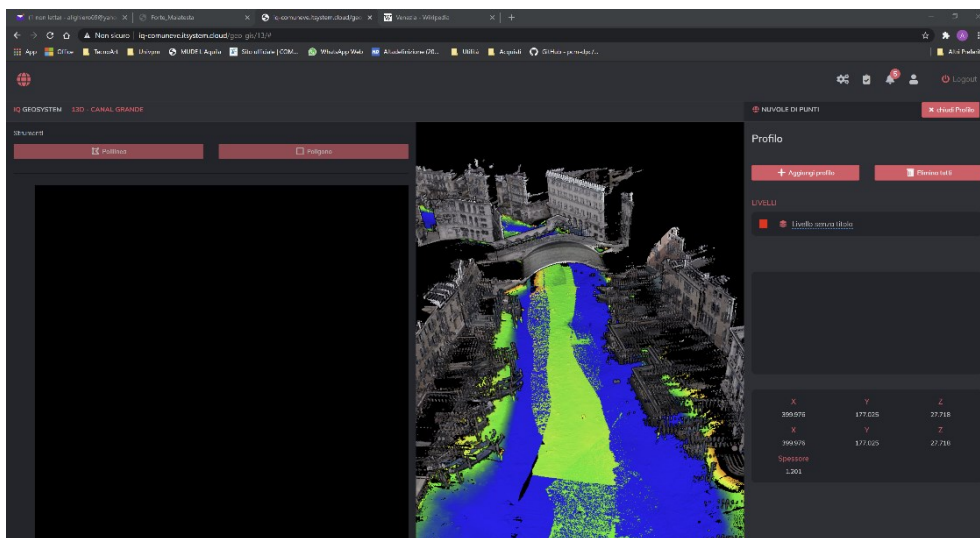


Figura 30 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo

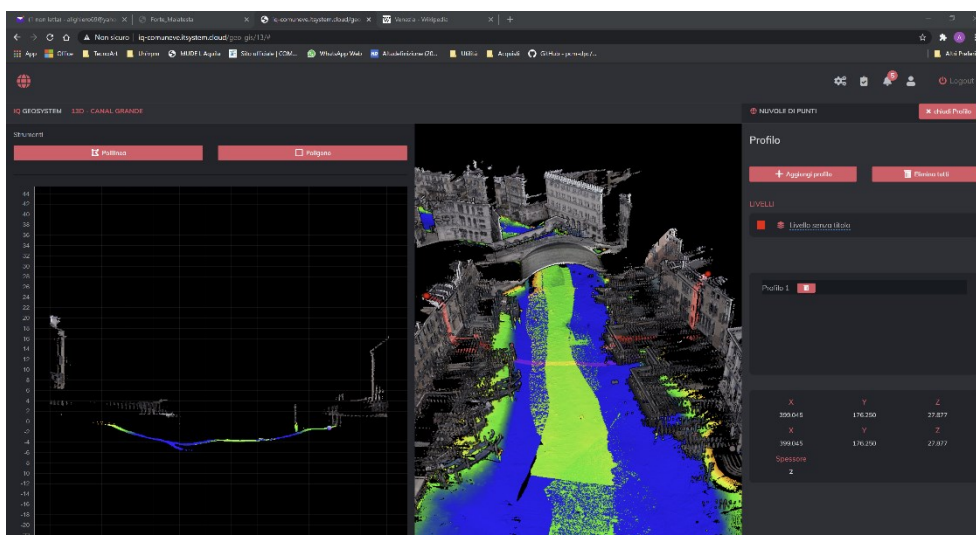


Figura 31 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo: scelta dei punti sulla nuvola

Questo tool permette di visualizzare contemporaneamente il box selezionato della nuvola evidenziato in colore rosso (nel riquadro centrale) e la vista ortogonale del piano XZ del box nel riquadro di sinistra. I due riquadri inoltre si aggiorneranno automaticamente e in tempo reale al variare delle caratteristiche del box di selezione. Le variazioni possono dipendere

dallo spostamento dei due punti sulla nuvola, e di conseguenza dell’asse X che essi individuano, oppure dallo spessore del volume evidenziato. Quest’ultimo può essere modificato inserendo manualmente la dimensione desiderata (in metri) al parametro “Spessore” presente nella parte inferiore del pannello “Profilo” sulla destra del layout.

Una volta individuato il volume di nuvola interessato la novità sostanziale sta nella possibilità di poter disegnare direttamente sulla nuvola di punti all’interno del riquadro a sinistra, in cui sono a disposizione due strumenti: “Polilinea” qualora si abbia la necessità di disegnare una polilinea aperta e “Poligono” nel caso si voglia rappresentare una spezzata chiusa. (Figura 32)

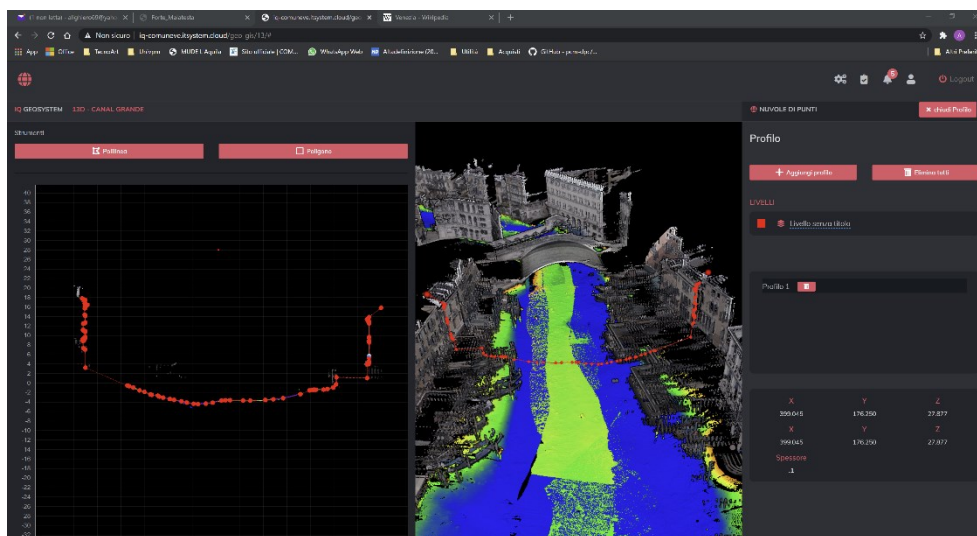


Figura 32 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo / Strumento Polilinea

Una volta disegnata la polilinea, automaticamente, si genererà un file *.dxf, per il profilo attivo, che attraverso l’apposito pannello (vedi Figura 28) potrà essere esportato.

Il file *.dxf esportato conterrà le forme disegnate all’interno del Profilo (è possibile inserire più profili e su ciascuno disegnare più polilinee e/o poligoni) e quest’ultimo sarà georeferenziato.

Ottenuto il file *.dxf sarà possibile modificare il disegno, realizzato all’interno della piattaforma, attraverso i molteplici software di disegno cad.

In questa fase i profili esportati dalla piattaforma potranno essere arricchiti di dati e potranno diventare elaborati tradizionali attraverso l’interpretazione critica di un utente qualificato,

Il “sistema urbano”

che potrà ricorrere di strumenti aggiuntivi (come, a solo titolo di esempio non esaustivo, una ortofoto generata da un rilievo fotogrammetrico) necessari alla definizione di diversi gradi di dettaglio coerenti con la scala di rappresentazione richiesta.

Un'altra possibile applicazione dello strumento appena descritto può essere quella realizzata su un prospetto di un palazzo.

Basterà individuare un profilo parallelo al prospetto che si desidera rappresentare e indicare l'opportuno spessore del volume di selezione.

Il risultato sarà quello visibile in Figura 33.

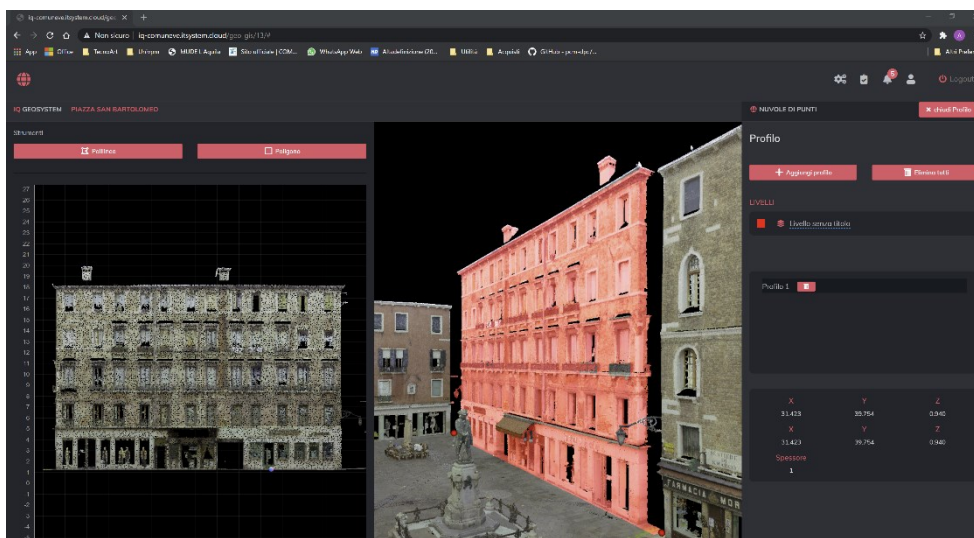


Figura 33 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo applicato ad un prospetto

Sarà quindi possibile disegnare i limiti delle porzioni e degli elementi di interesse con la consapevolezza della possibilità esportare tali linee e quindi successivamente modificarle. (Figura 34 e Figura 35)

Nel caso specifico le polilinee esportate dalla piattaforma sono state modificate e arricchite in ambiente cad grazie al rilievo fotogrammetrico dello stesso prospetto (Figura 36).

Si è ottenuto così un elaborato tradizionale bidimensionale (Figura 37).

Il “sistema urbano”

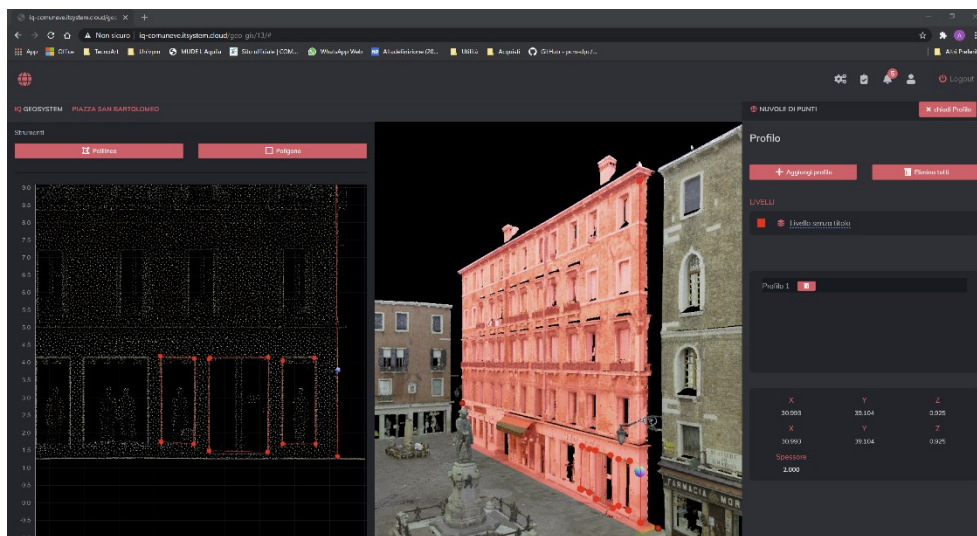


Figura 34 – Piattaforma / Pannello Disegno / Pannello Profilo / Strumento Polilinea

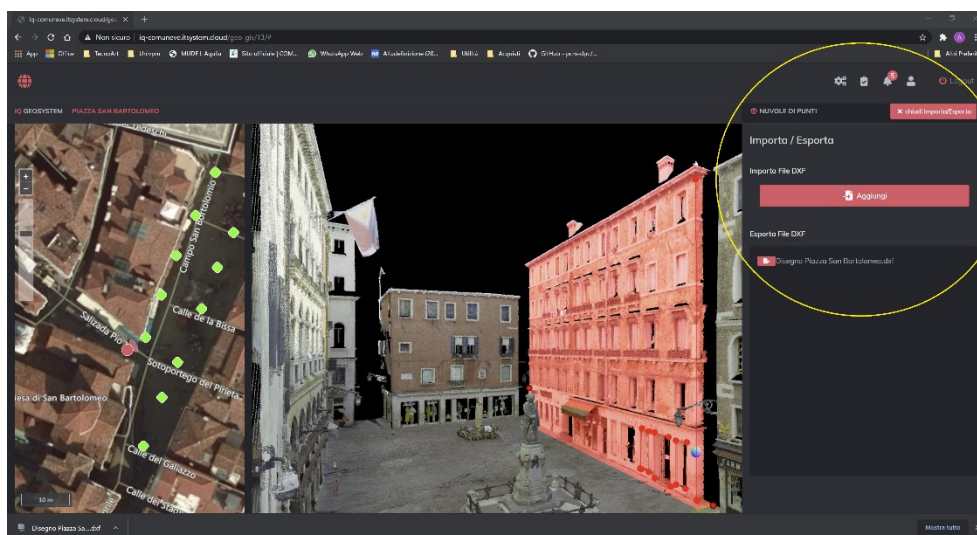


Figura 35 – Piattaforma / Pannello Importa-Esporta



Figura 36 – Ortofoto del prospetto ottenuto dal rilievo fotogrammetrico



Figura 37 – Prospetto: Elaborato tradizionale

L'ulteriore passaggio che è possibile realizzare è quello di importare gli elaborati redatti sulla piattaforma in una duplice veste.

La prima opzione è quella di re-importare il file *.dxf georeferenziato per visualizzare le polilinee (con le modifiche effettuate) direttamente sulle nuvole nella stessa posizione da cui è stato estratto il profilo. Questa strada potrebbe non essere particolarmente significativa nell'architettura storica, mentre potrebbe acquisire un significato e un'utilità più importante nel caso di profili stradali, pendii e situazioni simili in cui potrebbe essere necessario confrontare uno stato di fatto con uno stato progettuale.

L'altra opzione di importazione degli elaborati redatti che più si sposa con le esigenze dell'architettura è quella che permette di caricare gli elaborati come allegati della nuvola: come file *.pdf, direttamente visualizzabili all'interno della piattaforma, oppure in formato *.dwg di cui è possibile effettuare il download.

4. Il “sistema edificio”

4.1. Analisi dello stato dell’arte dei sistemi di gestione dei dati alla scala dell’edificio

4.1.1. Point cloud, Building Information Modeling (BIM) e HBIM

Nel corso degli ultimi venti anni, la nuvola di punti ha assunto un ruolo di predominanza nel campo del rilievo e della rappresentazione del patrimonio architettonico. Ne sono testimonianza l’attenzione che la ricerca ha dedicato alla nuvola di punti e alle sue applicazioni: numerosi e affidabili strumenti sono stati validati nelle tecniche imaged-based (Siebke et al., 2018), (Schonberger and Frahm, 2016), così come per le acquisizioni range based (Bryan et al., 2013; Costantino et al., 2020), sino ad arrivare all’integrazione delle due tecniche (Battini and Sorge, 2016), che oramai rappresenta una prassi più che consolidata.

Recentemente la ricerca sta spingendo l’utilizzo delle nuvole di punti oltre gli attuali limiti di impiego: nella documentazione del patrimonio architettonico la sfida maggiore è quella di generare flussi di lavoro in grado di fornire informazioni relative a scopi di conservazione o restauro. Alcuni autori seguono un possibile approccio di analisi su modelli tridimensionali al fine di creare un protocollo semiautomatico per fornire una mappa tematica del degrado degli edifici storici (Galantucci et al., 2018). Approcci simili sono possibili sia da flussi di lavoro derivanti da scansioni fotogrammetriche sia da raccolta dati TLS. Sono state quindi eseguite interessanti elaborazioni su modelli 3D, effettuando, ad esempio, mappe in falsi colori o filtri morfologici al fine di eliminare informazioni inutili per la rilevazione di alterazioni e per identificare regioni entro un valore soglia stabilito (Clini et al., 2014).

Con l’obiettivo di superare il tradizionale e manuale disegno del degrado, altri studi descrivono un metodo di estrazione delle informazioni, ottenuto con procedure matematiche, quantitative, ripetibili e verificabili (Nespeca and De Luca, 2016). Oltre all’approccio algoritmico, vale la pena citare l’approccio grafico semiautomatico e low-cost (Quagliarini et al., 2017) e le applicazioni di Intelligenza Artificiale (AI) che stanno emergendo sempre più anche nell’ambito dell’architettura storica. In particolare, nelle ricerche di machine learning (Grilli and Remondino, 2020; Morbidoni et al., 2020) e deep learning, le nuvole di punti sono oggi un tipo di dati emergente per creare informazioni geospaziali 3D più dettagliate del mondo reale (Ye et al., 2018).

A causa della massiccia digitalizzazione della Cultural Heritage, l'estrazione dei dati da un rilievo geometrico del patrimonio rappresenta solo un aspetto di un più ampio dibattito: la questione dei modelli informati 3D. Il punto di contatto è senza dubbio il campo dell'Heritage Building Modeling (HBIM). L'approccio HBIM inculca molte sfide ed esigenze, come la differenza tra oggetti semantici di standardizzazione e irregolarità o geometrie non segmentate, nonché la presenza di intelligenza parametrica derivata da dati geometrici accurati.

L'approccio comune è basato sulla raccolta dei dati (che si concretizza in una nuvola di punti) che vengono poi processati per l'acquisizione in ambiente BIM, per poi proseguire con la creazione di una mini libreria ad hoc di oggetti parametrici “storici” che vengono infine correlati alla geometria nel mondo virtuale (Dore et al., 2015) (Acierno et al., 2017). Tale approccio pur avendo comportato importanti vantaggi (modellazione semantica orientata agli oggetti che consente la classificazione di oggetti del patrimonio storico, elenchi automatici di oggetti e materiali e documenti di conservazione automatizzati) ha messo in evidenza anche i limiti dell' HBIM.

Una prima carenza, che si riscontra nel BIM applicato al campo dell' Heritage, è la mancanza di oggetti di libreria parametrica all'interno dei software BIM, che potrebbero rivelarsi estremamente utili per la restituzione di edifici storici o siti del patrimonio. Inoltre, il BIM, come strumento di nuova progettazione, generalmente non è in grado di modellare stati non ideali come fuori piombo, danno e deterioramento, che risultano di primaria importanza quando si documenta l'esistente.

(Apollonio et al., 2016) offrono un'accurata disamina dei fattori su cui lavorare per migliorare l'uso del BIM nell' Architectural Heritage (AH) e per incorporare il BIM nel processo del ciclo di vita dell' AH.

In questa ottica diversi lavori delineano un nuovo approccio per risolvere il problema dell'interoperabilità, sviluppando e testando un flusso di lavoro che sfrutta i vantaggi delle piattaforme BIM e delle tecnologie Semantic-Web, consentendo all'utente di interrogare un repository composto da dati HBIM semanticamente strutturati e arricchiti (Quattrini et al., 2017, 2015)

Tra le varie problematiche e prospettive dell' HBIM, è piuttosto recente il campo che indaga l'analisi strutturale. Esistono alcuni studi, ancora non del tutto risolutivi, che tentano di sfruttare direttamente il dato del rilievo (la nuvola di punti) ai fini dell'analisi strutturale.

Il “sistema edificio”

(Barazzetti et al., 2015) e poi (Godinho et al., 2020) propongono un approccio intermedio strutturato su due passaggi: la fase Cloud-to-BIM in cui il dato di rilievo viene usato per costruire il modello HBIM dell' oggetto rilevato e una successiva fase BIM-to-FEM in cui il modello viene esportato in un software dedicato per l' analisi strutturale.

4.1.2. Dalla nuvola di punti all'Analisi ad Elementi Finiti (FEA): stato dell'arte

L'affermazione di tecniche di rilievo per misure spaziali e geometriche più evolute e precise avvenuta nell'ultimo decennio ha suscitato interesse anche nella comunità dell'ingegneria civile solo negli ultimi anni. Per l'analisi strutturale i dati morfo-geometrici forniti (unitamente alla caratterizzazione dei materiali) rappresentano i dati di input per la valutazione e l'analisi del comportamento strutturale e acquistano particolare importanza soprattutto per gli edifici storici in muratura.

Nello specifico, la valutazione e l'analisi del comportamento strutturale che si intende indagare con particolare riguardo è quella dell'Analisi agli Elementi Finiti (FEA) che permette di discretizzare il continuum in un insieme di elementi finiti interconnessi da nodi. A tal fine è necessario fornire un input dati che sia un modello solido tridimensionale rappresentativo dell'oggetto da valutare.

Negli ultimi anni ci sono stati alcuni tentativi nella ricerca di soluzioni sempre più ottimali che permettano di realizzare modelli 3D basati sulla nuvola di punti. Nonostante ciò, la realtà è che comunemente la nuvola di punti non viene utilizzata direttamente per realizzare il modello computazionale necessario per l'analisi agli elementi finiti.

Un esempio dei sopracitati tentativi è quello di (Caroti et al., 2012) che verifica la possibilità di utilizzare i dati LIDAR per produrre modelli 3D utili per l'analisi e la verifica strutturale degli edifici. Questa ricerca utilizza il SAP2000 v.14 come software di calcolo strutturale ma, per generare un modello computabile da tale software a partire dai dati ottenuti dalla nuvola di punti, sono state riscontrate problematiche che hanno portato a numerose elaborazioni e modifiche dei dati originali.

Altre tecniche di meshing di geometrie complesse prevedono la ricostruzione del volume a partire da sezioni piane parallele, utilizzate per generare il modello 3D eseguendo un'estrusione lungo l'allineamento delle sezioni trasversali (Laefer and Truong-Hong, 2017), oppure tramite l'utilizzo di slices della nuvola, dove la geometria 3D originale è ottenuta imponendo il passaggio della superficie del solido per tutte le slices consecutive (Bitelli et al., 2016), (Castellazzi et al., 2015), (Castellazzi et al., 2017).

L'evoluzione di questi tentativi di sfruttare al meglio la nuvola di punti (perdendo la minor quantità di informazioni e riducendo al minimo il numero di operazioni svolte dall'operatore) negli anni ha prodotto progressivamente metodologie più o meno performanti.

Il “sistema edificio”

(Tognaccini, 2009) propone una prima classificazione delle metodologie precedentemente perseguite nel tentativo di creare un modello basato sulla nuvola di punti.

(Korumaz et al., 2017) estende questa classificazione, che afferma che il modello strutturale può essere ottenuto in cinque modi diversi.

Le quattro metodologie proposte basate sulla nuvola di punti prevedono due metodologie che utilizzano indirettamente i dati del rilievo (prevedono passaggi intermedi che introducono una perdita di informazioni) e altre due metodologie che invece sfruttano appieno i dati originari provenienti dal rilievo TLS (e/o fotogrammetrico), tenendo conto degli attuali strumenti di calcolo e dei software disponibili.

Il primo gruppo comprende le metodologie "Modello CAD basato su dati della nuvola di punti" e "Creazione modello mesh e curve". La prima prevede la generazione del modello in un ambiente cad utilizzando solidi primitivi e le loro combinazioni tramite operazioni booleane. In questo approccio, la nuvola di punti non è altro che una guida. È superfluo dire che la presenza di geometrie non ordinarie o di difetti costruttivi (ad esempio un fuori piombo della muratura) è sufficiente affinché il risultato non sia sufficientemente aderente alla realtà. La seconda metodologia pur rimanendo nella modellazione in ambiente cad, prevede la generazione della mesh dalla nuvola di punti originale, che verrà poi utilizzata per creare curve (ottenute come fette di mesh) (Fortunato et al., 2017). Il solido verrà quindi generato attraverso il comando "loft" di Autocad passando per le curve generate dalla mesh. Rispetto alla tecnica precedente, il miglioramento del risultato ottenuto è già notevole (in questo caso un'eventuale fuori piombo, di cui sopra, sarebbe fedelmente riportato nel modello generato), ma resta determinante il fattore di discrezionalità dell'operatore nella scelta dell'intervallo di misura tra una curva e l'altra. Inoltre la presenza di forme geometricamente complesse, con questo approccio, resta comunque difficile da rappresentare.

Il secondo gruppo della classificazione proposta da (Korumaz et al., 2017) individua due tecniche più avanzate. Queste, partendo dalla nuvola di punti, generano una mesh e poi la convertono in NURBS (Non-uniform Rational Basis-Splines) oppure direttamente in un modello solido.

L'approccio considerato il più performante dal punto di vista dell'accuratezza secondo (Korumaz et al., 2017) è quello che prevede la creazione di una mesh, da nuvola di punti, e la successiva conversione in NURBS.

In pratica, questo metodo richiede all'operatore di identificare piani di sezione significativi che intercettano la mesh dell'oggetto e identificano le NURBS.

Queste NURBS vengono quindi considerate come confini fissi dell'oggetto dal software che creerà un solido racchiuso dalle nurbs di confine, individuati dall'operatore. Questo metodo è piuttosto dispendioso dal punto di vista della tempistica che cresce a seconda della complessità dell'oggetto. Questo approccio è molto indicato nel campo dell'ingegneria meccanica, prendendo il nome di reverse engineering, dove i componenti sono costituiti dall'accostamento di semplici elementi solidi. Nel campo dell'ingegneria civile è stato testato ottenendo buoni risultati ma con elementi di piccole dimensioni come le travi in legno di una copertura (Bassier et al., 2016), ma risulta piuttosto scomodo nel caso di edifici di grandi dimensioni con un grado di complessità maggiore.

Per la complessità e l'irregolarità tipiche degli edifici storici in muratura, l'approccio che genera una mesh dalla nuvola di punti e poi la converte in un oggetto solido (tramite software che supportano questa operazione) è il più utile (la metodologia definita "Crea mesh e modello solido" da (Korumaz et al., 2017)).

Pertanto l'originaria classificazione proposta da (Korumaz et al., 2017) viene revisionata, inserendo l'ulteriore discriminante del giudizio dell'operatore, così come schematizzato in Figura 38.

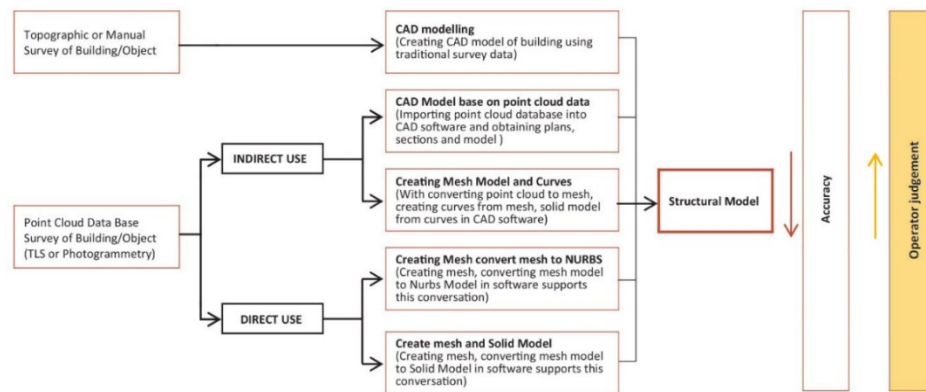


Figura 38 – Classificazione dei metodi per la generazione di modelli strutturali

In linea con la metodologia "Crea mesh e modello solido", lo studio di (Visintini and Spangher, 2014) ha sfruttato la nuvola di punti di un oggetto di piccole dimensioni (una statua

Il “sistema edificio”

romana) per generare un modello utilizzato direttamente all'interno del software Rhinoceros attraverso lo strumento Scan & Solve. Questa funzione ha permesso di considerare l'intero volume con molti piani XY, XZ e YZ che generano dei "cubi" su cui variano le equazioni di equilibrio differenziale, diverse da quelle appartenenti al dominio (interne all'oggetto) o che lo circondano (sulla superficie dell'oggetto).

(Bagn ris et al., 2017) conduce uno studio simile a quello appena citato, ma con un Livello di Dettaglio (LOD) pi  raffinato.

Seguendo questo approccio, il Livello di dettaglio (LOD) della discretizzazione della mesh   un elemento di grande importanza per ottenere un'analisi strutturale pi  fedele al comportamento reale della struttura (Spangher and Visintini, 2015)

L'obiettivo di un LOD sempre crescente mette in luce due facce della stessa medaglia: da un lato migliora l'affidabilit  e la qualit  delle analisi e delle valutazioni effettuate (Giaccone et al., 2020), dall'altro aumenta il grado di complicit  nell'interoperabilit  tra software.

Il software agli elementi finiti ha un concetto di mesh diverso rispetto alle mesh triangolari generate direttamente dalle nuvole di punti.

Per spiegare questa differenza, prima   necessario chiarire la differenza tra superfici mesh e NURBS (Non Uniform Rational Basis-Splines) a livello matematico: la mesh rappresenta superfici 3D discrete (costituite da singole facce piane); le Nurbs, invece, sono superfici matematiche, capaci di rappresentare continuamente forme complesse.

Come accennato in precedenza, la costruzione di curve nurbs, che generano una superficie nurbs,   un processo laborioso inadatto alla complessit  della geometria di un'architettura.

Esiste, tuttavia, un grado intermedio tra la superficie nurbs e una mesh triangolare: una superficie NURBS (patch)   ottenuta da una serie di curve NURBS in due direzioni (chiamate "U" e "V") interpolate per creare una superficie come un prodotto tensoriale di due curve NURBS, che origina un patch quadrangolare (Barsanti and Guidi, 2018).

Quello che si pu  fare   quindi riorganizzare la topologia iniziale della mesh, trasformando la mesh da triangolare a quadrangolare. Questo rende la mesh molto pi  simile e facilmente assimilabile ad una superficie nurbs che   la logica con cui ragiona il mesher volumetrico del software FEM.

Questo passaggio, che prende il nome di Re-topologia (Retopology), permette quindi di evitare molteplici problemi di interoperabilit  tra software che ragionano con logica a maglia triangolare e FEM. Allo stesso tempo consente anche un LOD variabile all'interno della

stessa mesh, permettendo di "investire" un maggior numero di patch dove la geometria lo richiede (nei punti più complessi) e un numero minore dove la geometria è più elementare. In questo modo, a parità di numero di facce, è possibile ottenere un maggiore affinamento del modello 3D con una conseguente crescente aderenza alla realtà.

4.1.3. L’analisi strutturale come validazione del metodo

Le strutture storiche in muratura costituiscono sia una risorsa economica che un patrimonio culturale per molti Paesi. Tuttavia, questi edifici sono estremamente fragili, soprattutto se sottoposti a forze orizzontali, a causa di diversi fattori: geometrie complesse, evoluzioni strutturali differenziate nel tempo e degrado (Valente and Milani, 2016), (Clementi et al., 2019). Per la conservazione di queste strutture è necessario individuare metodi che tengano sotto controllo il loro stato di salute per intervenire il prima possibile. In quest’ottica va ricordato che qualsiasi intervento su questi edifici deve essere opportunamente studiato in quanto interventi invasivi possono compromettere il valore storico e artistico del bene. Da questo punto di vista la ricerca si sta orientando verso gli Ambient Vibration Test (AVT), detti anche Operational Modal Analysis (OMA), consistenti nell’acquisizione delle proprietà dinamiche delle strutture tramite sensori accelerometrici posti in punti significativi, senza interrompere l’uso comune dell’edificio. I parametri dinamici sono funzioni sia della massa che della rigidità degli edifici; quindi la loro variazione potrebbe indicare l’innesco di un fenomeno di degrado (Doebling et al., 1996). Esistono due tipi di OMA: monitoraggio a breve e a lungo termine. Il monitoraggio a lungo termine dura almeno un anno, con gli accelerometri posti nei punti più significativi rimasti in registrazione continua. In questo modo è possibile verificare in tempo reale eventuali danni alla struttura, prestando attenzione ai falsi positivi che possono essere generati da fattori ambientali come temperatura e umidità. Ad esempio, la presenza di ghiaccio nella muratura può aumentare le frequenze chiudendo i vuoti nei materiali, oppure l’alta temperatura può dilatare le catene in acciaio, riducendo le frequenze strutturali (Boscato et al., 2013), (Gentile et al., 2019), (Venanzi et al., 2019). Negli ultimi anni, alcuni autori hanno sviluppato algoritmi per filtrare i dati da queste anomalie (Ubertini et al., 2017), (Venanzi et al., 2020). Il monitoraggio di breve termine, invece, viene effettuato in un giorno, consentendo di estrarre le caratteristiche dinamiche attuali della struttura, che possono essere utilizzate per costruire un modello numerico (NM), o per avere uno scenario di riferimento per successivi monitoraggio a lungo termine (De Stefano et al., 2016), (Gentile and Saisi, 2007)

Nel caso specifico di questa ricerca, al fine di validare e testare il Modello ad Elementi Finiti (FEM) generato attraverso la filiera sperimentata ci si è serviti di questa seconda tipologia di OMA, quello a breve termine. Per raggiungere questo obiettivo è fondamentale disporre di un modello geometrico il più possibile rispondente alla realtà. Una volta ottenuto il modello,

i parametri lineari dei materiali utilizzati vengono variati per minimizzare la differenza tra risultati sperimentali e numerici (Gentile and Saisi, 2007), (Standoli et al., 2020).

4.2. Metodologia: lo sviluppo di una filiera affidabile dalla nuvola all’analisi strutturale

L’obiettivo principe di questo lavoro è stato quello di creare un percorso ottimizzato per poter sfruttare, quanto più direttamente e senza perdita di dati, l’oggetto “nuvola di punti” per la generazione del modello ad elementi finiti (FEM) da utilizzare per l’analisi e le valutazioni strutturali.

Il risultato sinora raggiunto è stato il prodotto di vari tentativi testati direttamente su casi studio al fine di validarne la bontà e l’efficacia. Riguardo ai casi studio, di cui si tratterà specificatamente nel paragrafo successivo (cfr paragrafo 4.3), occorre fare una precisazione: i casi studio sono due, mentre gli step affrontati per l’ottimizzazione della metodologia sono stati tre.

Nel dettaglio: il campanile di San Ciriaco ad Ancona ha rappresentato il primo approccio che ha posto le basi per tale studio (Paragrafo 4.3.1), si è tentato, poi, di implementare e migliorare quest’ultimo sul caso studio della Torre del Borgo a Recanati (Paragrafo 4.3.2) ed infine si è ottimizzato e testato il workflow finale sul primo caso studio di Ancona (Paragrafo 4.3.3).

Al fine di rendere comprensibili i passaggi e le operazioni necessari per raggiungere l’obiettivo finale è utile descrivere brevemente la logica dei software e del metodo stesso degli Elementi Finiti.

Il Metodo FEM si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti, pertanto, è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (tetraedri o esaedri nel caso di domini 3D).

A questo punto è necessario fare un approfondimento sul concetto di mesh 3D inteso nel mondo FEM comparato al più consueto concetto di mesh 2D del mondo del rilievo.

Partendo dal mondo del rilievo, la mesh è il risultato ottenibile come prodotto derivabile dalla nuvola di punti e rappresenta una superficie costituita da una maglia di poligoni, individuati da nodi e lati in comune fra questi. La mesh così intesa, pur rappresentando un oggetto tridimensionale nello spazio, è definita 2D in quanto gli elementi che la compongono (i

poligoni, nella prassi triangoli) hanno appunto la caratteristica della bidimensionalità (Figura 39).

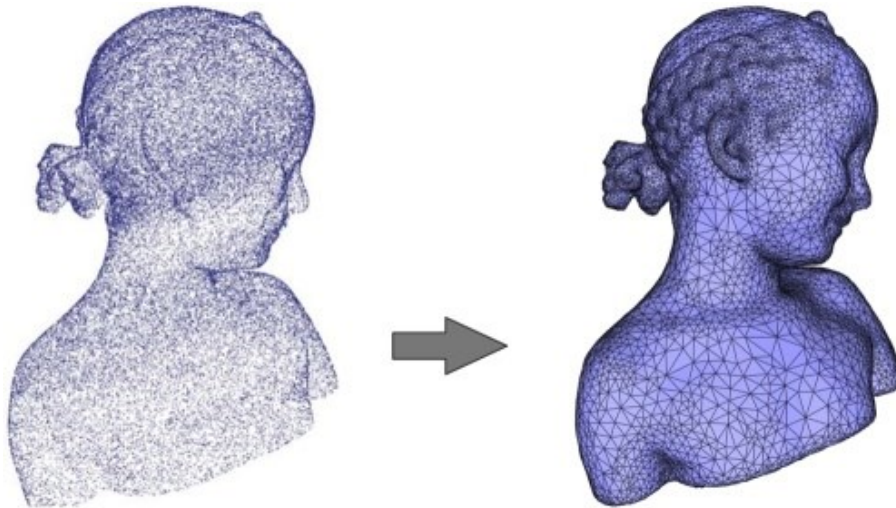


Figura 39 – Nuvola di punti (a sinistra) e mesh 2D (a destra)

Tali mesh sono quindi a tutti gli effetti una superficie discretizzata che, secondo diversi algoritmi, vanno a ricostruire la superficie dell’ oggetto rilevato attraverso la nuvola di punti. Esse possono essere aperte nel caso in cui la mesh non rappresenti l’ involucro chiuso di un volume, oppure chiuse nel caso contrario. Nel caso di mesh chiusa, questa viene definita anche stagna, a rimarcare il concetto che non vi siano buchi.

Si sottolinea che, anche nel caso di mesh stagne, la mesh rimane un’ entità 2D; in altre parole l’ oggetto rappresentato da una mesh stagna è un oggetto cavo al suo interno che, qualora fosse tagliato da un piano, genererebbe due mesh aperte.

Nel caso delle mesh 3D degli ambienti FEM, al contrario, la mesh è un’ entità 3D: gli elementi base che costituiscono la mesh 3D sono tetraedri (o esaedri) che sono appunto entità tridimensionali e sono a tutti gli effetti dei solidi. (Figura 40)

Il “sistema edificio”

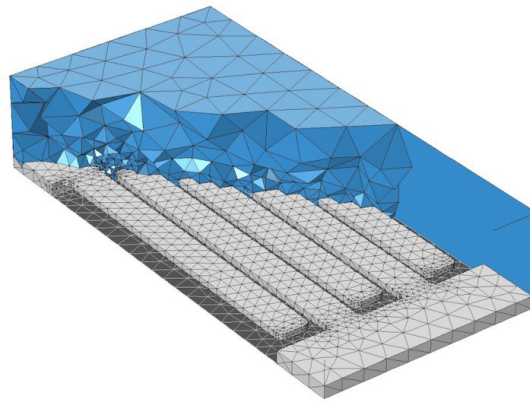


Figura 40 – Esempio di Mesh 3D con i tetraedri che la costituiscono

Se le mesh 2D sono la discretizzazione di una superficie e derivano dalla nuvola di punti, le mesh 3D sono la discretizzazione di un volume e derivano da un solido iniziale.

I software FEM basandosi su questa logica generano il modello 3D costituito dalla mesh 3D attraverso due passaggi:

- in una fase preliminare permettono di modellare il volume attraverso operazioni booleane di primitive solide (cubi, parallelepipedi, sfere, tori, etc.) che rappresenti l'oggetto da analizzare;
- terminata questa prima fase, il solido prodotto viene processato da un generatore di mesh 3D che discretizza il volume rappresentato in tanti piccoli volumi base che, tra attigui, hanno gli spigoli in comune.

A questi singoli elementi base sarà poi possibile assegnare una caratterizzazione dal punto di vista materico (con le caratteristiche fisco-meccaniche associate), così come sarà possibile assegnare vincoli e forze esterne.

Fatta questa ampia premessa è ora possibile semplificare e scomporre l'obiettivo di questo studio: si tratta, banalmente, di trovare una filiera in grado di trasformare la nuvola di punti in un oggetto solido! Questo solido importato direttamente in ambiente software dovrà essere semplicemente processato per essere discretizzato in mesh 3D.

Partendo dal dato di partenza della nuvola di punti si dovrà quindi ottenere un solido che sia riconosciuto come tale al momento dell’ importazione nell’ ambiente FEM. Per avere un quadro generale si riporta subito un indice grafico sintetico di quelle che sono le fasi da dover soddisfare (Figura 41).

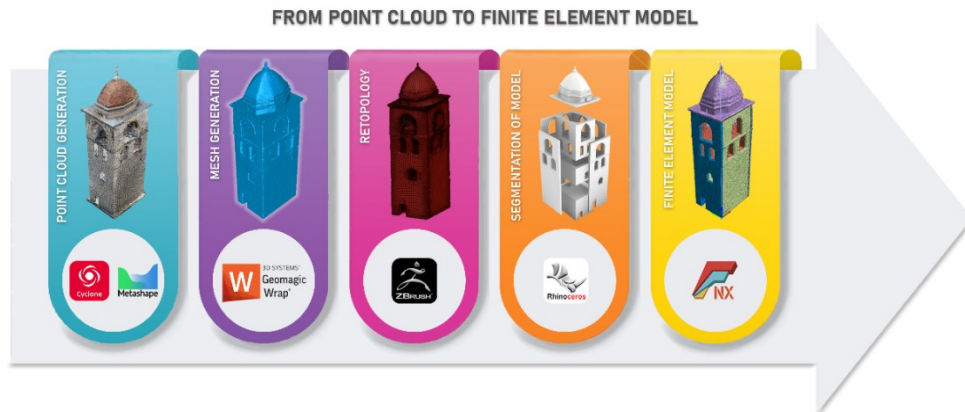


Figura 41 – Workflow sintetico delle fasi del processo di generazione di un FEM dalla nuvola di punti

Dalla nuvola alla mesh 2D

Il passaggio dalla nuvola di punti alla mesh 2D è un processo comune nella filiera del rilievo digitale e gestito da numerosissimi software.

Sono due gli aspetti fondamentali, al di là del software utilizzato.

Il primo riguarda la pulizia della nuvola prima della generazione della mesh stessa. Considerando l’ obiettivo cui si tende, nelle operazioni di pulizia della nuvola dovranno essere eliminati tutti quei punti che non rappresentano un elemento strutturale dell’ oggetto rilevato o, in alcuni casi, tutti quei punti che rappresentano oggetti che non si vogliono analizzare direttamente tramite FEM (fossero anche parti strutturali secondarie, come potrebbe essere un solaio secondario, oppure elementi secondari di una struttura di copertura).

Il secondo aspetto cui è necessario porre molta attenzione è la chiusura dei buchi presenti nella mesh generata dalla nuvola di punti. Inevitabilmente, infatti, proprio a causa dell’ operazione precedente, ci saranno porzioni di nuvola mancanti che all’ atto della generazione della mesh daranno luogo a delle discontinuità.

Il “sistema edificio”

È pertanto indispensabile ricostruire la continuità della mesh attraverso comandi del tipo “fill hole” presenti in tutti i software che si occupano di generazione e modifica di mesh.

Completata questa operazione si sarà così ottenuta una mesh 2D stagna che al proprio interno ingloba il volume che sarà, alla fine delle operazioni, analizzato dal software FEM.

Si sottolinea che non è necessario, anzi è sconsigliato, in questa fase operare decimazioni del numero dei triangoli o azioni di riparazione delle mesh. Tali operazioni, infatti, influirebbero significativamente su Livello di Dettaglio (peggiorandolo) e non comporterebbero alcun vantaggio. Questi accorgimenti, in parte necessari, saranno assolti dai software di Retopology nella fase successiva, quindi ottenuta la mesh stagna non resta che esportarla con il massimo livello di dettaglio.

Retopology

La “retopologia” (Retopology) è il processo di conversione dei modelli ad alta risoluzione in qualcosa di molto più piccolo, nato e sviluppatosi per il campo dell’ animazione digitale e della conversione di modelli di sculture digitali.

Così come descritta potrebbe apparire una semplice decimazione della mesh, ma non è propriamente così. La Retopology infatti ridisegna la maglia della mesh, introducendo il concetto di mesh quadrangolare. Come già descritto nel paragrafo 4.1.2 questo nuovo disegno della maglia sulla superficie della mesh ha il duplice vantaggio di rendere affine la descrizione del volume al mesher volumetrico dei software FEM e quello di poter ottenere un elevato LOD (Level of Detail) a fronte di un grande risparmio di patch delle mesh.

Quest’ ultimo risultato è possibile ottenerlo impiegando patch diverse in numero e dimensione sulla base del grado di dettaglio della porzione di superficie da discretizzare: se una superficie è povera di dettagli e assimilabile ad una superficie piana le patch saranno di dimensione maggiore e conseguentemente in numero minore, se la superficie rappresenta un dettaglio geometricamente complesso, al contrario, le patch avranno una dimensione inferiore in modo da potersi meglio adattare e saranno numericamente di più in rapporto con la superficie rappresentata.

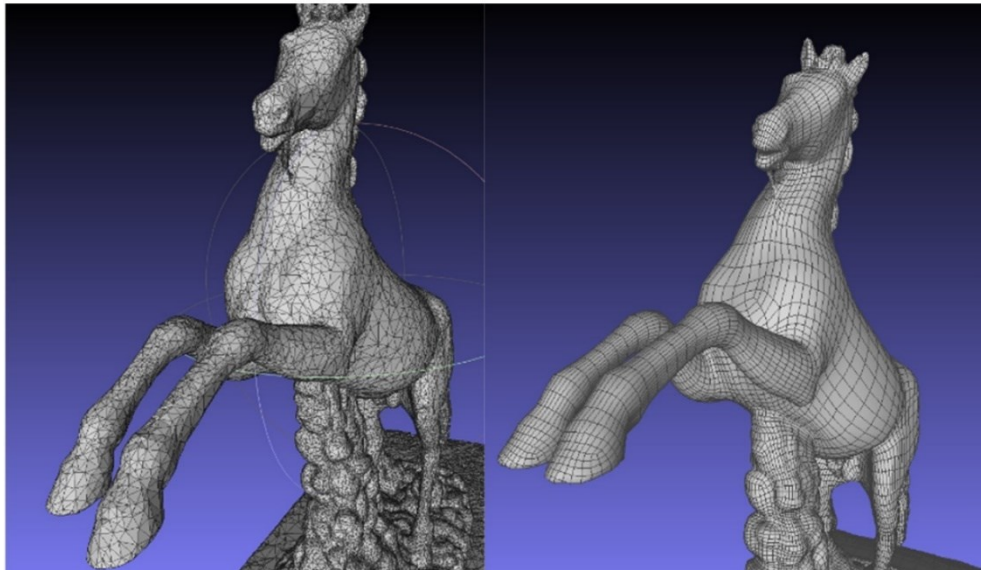


Figura 42 – (Barsanti and Guidi, 2018) Cavallo Buontalenti nella Galleria degli Uffizi. A sinistra il modello a mesh triangolari ottenuto dopo una semplice decimazione, a destra il modello retopologizzato. La mesh triangolare originale contava oltre un milione di poligoni, quella retopologizzata ne conta 35mila

Passaggio da mesh 2D a solido e segmentazione del modello

Risolti tutti i problemi di definizione di dettaglio, numero e forma dei poligoni costituenti la mesh 2D resta l'ultimo fondamentale passaggio.

La mesh infatti, pur con tutte le migliorie sinora ottenute, rimane comunque una superficie che se importata direttamente nel software FEM non viene riconosciuta come solido, bensì come superficie e di conseguenza non è possibile ottenere una discretizzazione in volumi base 3D.

Per risolvere questo passaggio è necessario il software Rhinoceros©. Al momento non sono stati trovati software in grado di effettuare la stessa operazione con lo stesso grado di accettabilità del risultato.

In particolare il comando “meshAnurb” (“meshtonurb” nella versione inglese) è quello che trasforma la mesh importata, che viene riconosciuta come “Mesh chiusa”, in un “Solido polisuperficie chiuso”.

Il “sistema edificio”

Tale comando ha, al momento, dei limiti computazionali collegati al numero di poligoni della mesh che si importa. Dai tentativi effettuati il limite si aggira intorno alle centomila facce, oltre il quale il comando di conversione da mesh a solido non è in grado di completarsi.

Tale limite nel numero di poligoni è stato l' ostacolo più grande da superare in quanto nei vari tentativi si doveva giungere ad un adeguato compromesso tra numero di facce della mesh e livello di dettaglio della geometria. Come spiegato sopra però, la Retopology è stato un grande incentivo nel superare tale problema.

Arrivati a questo punto l' ultima operazione da dover eseguire è quella della suddivisione del solido in più solidi, coerentemente con la semantica della struttura e soprattutto con l' ottica di assegnare a ciascuna porzione il proprio materiale costituente.

Terminata questa ultima operazione è possibile esportare il file in un formato riconoscibile dal software FEM.

Importazione in ambiente FEM

Il solido esportato da Rhinoeros© e importato nel software FEM viene riconosciuto come solido e mantiene la segmentazione. È quindi già pronto per essere preso in carico dal generatore di mesh 3D che, a seconda dei parametri di input, discretizzerà il solidi importati in “brick”, volumi tetraedrici base sul quale il software effettuerà le analisi.

4.3. Casi studio

La scelta dei casi studio su cui testare la metodologia proposta si è orientata su una precisa tipologia edilizia: le torri storiche in muratura.

Tale scelta è stata dettata da molteplici motivazioni. Le torri in modo particolare nel nostro Paese, infatti, sono un patrimonio architettonico numericamente rilevante e spesso in posizione strategica all'interno dei centri cittadini. La loro altezza e posizione richiederebbero un costante monitoraggio per definirne lo stato di conservazione.

Dal paesaggio naturale delle campagne, passando per i piccoli centri abitati sino al contesto urbano delle grandi città, le torri rappresentano spesso entità diffuse e distinguibili ma armonizzate nei paesaggi che le ospitano. Hanno un profondo significato storico e simbolico e incarnano le caratteristiche distintive dei metodi costruttivi del passato, principalmente legati alla muratura.

Le torri, difensive, religiose o civiche sono, allo stesso tempo, patrimonio architettonico e strutture che sfidano il loro tempo: il loro tempo di vita supera agevolmente almeno il paio di secoli per giungere in moltissimi casi ben oltre, periodi temporali non concepiti nelle moderne costruzioni.

Nella maggior parte dei casi, queste strutture erano il top della tecnologia ingegneristica e architettonica del loro tempo e della loro regione, dando dimostrazione di una profonda conoscenza empirica riguardo ai materiali disponibili localmente e alle soluzioni costruttive. Ciò nonostante, proprio a causa della loro longevità, necessitano di controlli e manutenzione. Inoltre l' altezza, loro caratteristica principale, le espone ad una vulnerabilità intrinseca nei confronti delle azioni sismiche. Per questo è fondamentale indagare il loro comportamento strutturale non limitandosi all' aspetto statico ma anche a quello dinamico.

Infine, la stessa altezza delle torri, che ne fanno strutture con uno sviluppo in una direzione prevalente rispetto alle altre, rendevano la loro tipologia strutturale utile alla sperimentazione dell' interferometria applicata alle strutture.

4.3.1. Campanile di San Ciriaco – Ancona (AN)

Il primo caso studio preso in esame è stato il campanile di San Ciriaco ad Ancona (AN). L'edificio a torre sorge sulla sommità del colle Guasco completamente separato dal corpo di fabbrica della Chiesa (Figura 43).

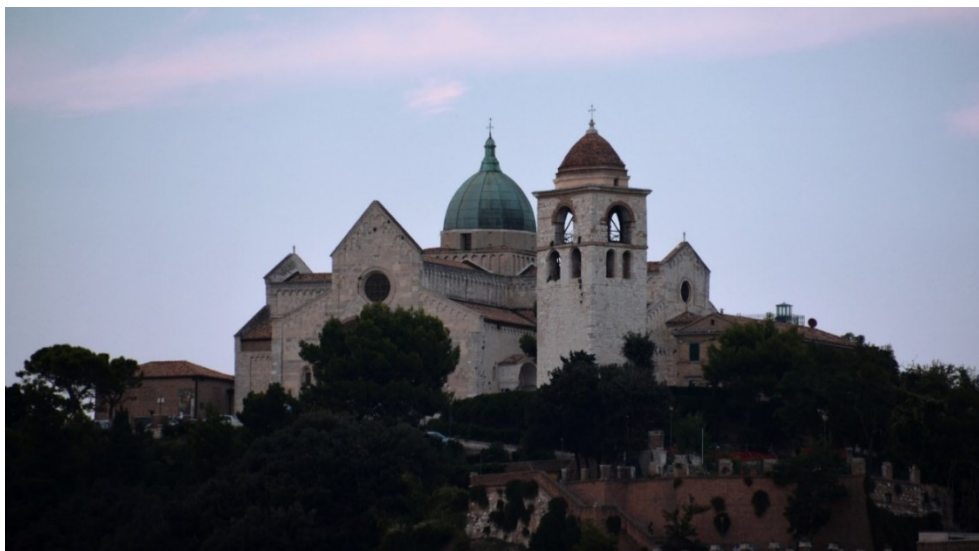


Figura 43 – Vista del Colle Guasco dal Porto di Ancona

Il campanile fu probabilmente costruito sulla base di una precedente torre militare appartenente al sistema di mura difensive che coronavano la sommità del colle. L'ipotesi dell'origine militare dell'edificio (e quindi di non appartenenza all'impianto della fabbrica del Duomo) è supportata dalla forma rettangolare della pianta e dalla sua rotazione rispetto alla pianta della chiesa.

Nel corso degli anni sono state apportate numerose modifiche alla torre: vi sono alcune testimonianze risalenti al 1553 che ricordano un orologio nella posizione attualmente occupata dalle monofore, pertanto prima di quell'anno è da ricondurre un consolidamento statico che portò alla chiusura delle quattro coppie di monofore e la finestra sulla facciata principale. Nel 1548 un incendio distrusse la cupola sommitale che fu poi ricostruita; da quel momento la cupola e la sua copertura furono oggetto di numerosi interventi fino all'ultimo restauro del dopoguerra degli anni '60. In occasione di quest'ultimo, oltre al rifacimento della copertura, fu effettuato un consolidamento dell'intera costruzione che comprendeva diversi

interventi: il miglioramento delle mura perimetrali con perforazioni armate, la sostituzione del solaio esistente della cella campanaria con uno nuovo in cemento armato parzialmente incassato nella sezione muraria delle pareti perimetrali e la creazione di un nuovo castello per le campane in acciaio, indipendente dalla struttura muraria e appoggiato al solaio in cemento armato. Inoltre furono riaperte le otto “monofore” e la finestra sulla facciata principale.

La pianta della torre è rettangolare, forma che rimane pressoché inalterata fino alla sommità, dove si chiude con un cornicione. Al di sopra di esso si trova un tamburo ottagonale su cui poggia una cupola ellittica. La cupola è in mattoni e la copertura in ardesia è costituita da scaglie di terracotta.

In corrispondenza della prima finestra del prospetto principale, posta a quota 7.40 m, è presente un solaio calpestabile sostenuto da due volte a crociera con nervatura centrale in laterizio con elementi in pietra tufacea.

In realtà il piano di calpestio non grava direttamente sulle volte. A seguito dei lavori di restauro eseguiti nel 1933-35, sull'estradosso delle volte è stata realizzata una soletta in cemento armato che ingloba telai orizzontali di irrigidimento in acciaio, rinforzati agli angoli da ferri cantonali. Grazie a questo sistema il pavimento pesa direttamente sulle pareti e i ferri fungono, inoltre, da raccordo per i muri perimetrali.

A tre quarti dell'altezza si trova una coppia di monofore con arco leggermente ribassato.

Tra le monofore e le bifore, a quota 14,90 m, è posto il solaio in cemento armato che sostiene la struttura in acciaio delle quattro campane. Il solaio è parzialmente annegato nel muro e si configura come una semplice soletta in calcestruzzo armato sorretta da due travi, anch'esse in calcestruzzo armato, disposte ortogonalmente tra loro.

Le quattro grandi finestre del campanile sono tutte uguali: all'esterno hanno un arco a tutto sesto con un grande cornicione in mattoni, mentre all'interno hanno un secondo arco a sesto acuto.

La muratura è a sacco e di spessore variabile di circa 1,16 m. La facciata esterna della torre è quasi interamente realizzata con blocchi squadri di calcare del Conero (il mattone compare solo negli elementi decorativi o al posto delle pietre mancanti a seguito dell'intervento di “scuci-cuci”). Il rivestimento interno è invece realizzato in mattoni, pietra del Conero e tufo.

4.3.1.1. La campagna di rilievo

La campagna di acquisizione dati è stata effettuata con il Laser Scanner Terrestre e ha rilevato l'intera area del complesso del Duomo di San Ciriaco. Dopo un'attenta fase di progettazione del rilievo, la campagna di rilievo è stata svolta in una giornata con una durata di circa 6 ore per l'acquisizione di dati laser e materiale fotografico per la generazione di foto panoramiche. Lo Scanner utilizzato è stato un Leica Scan Station P40 All in One.

In totale sono state effettuate scansioni da 29 stazioni: dieci all'interno della torre (Figura 45) e diciotto esterne (Figura 44), di cui una frontale all'ingresso della torre che permettesse l'allineamento delle acquisizioni interne con quelle esterne.

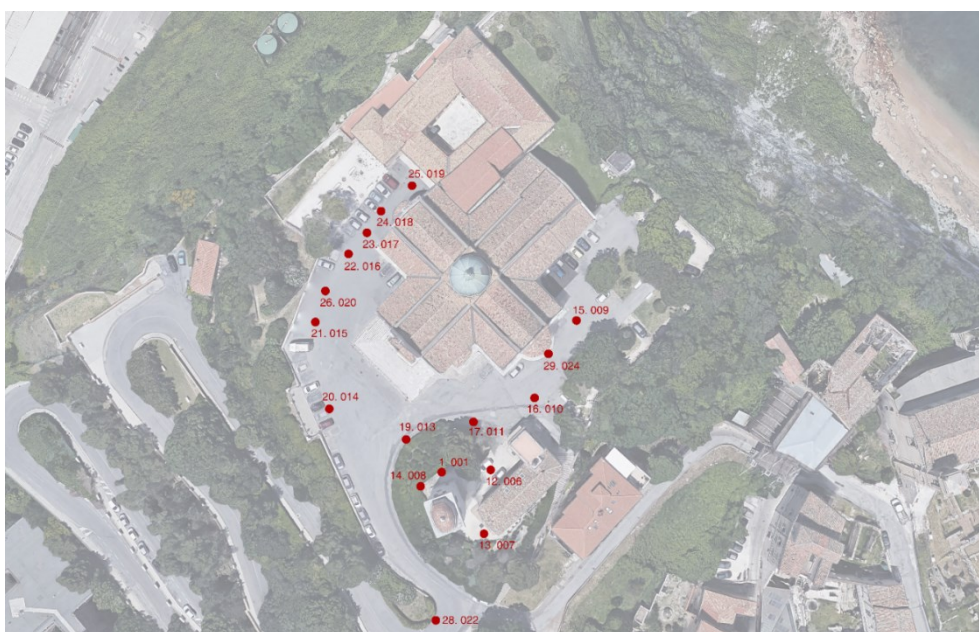


Figura 44 – Posizioni delle scansioni esterne al Campanile di San Ciriaco

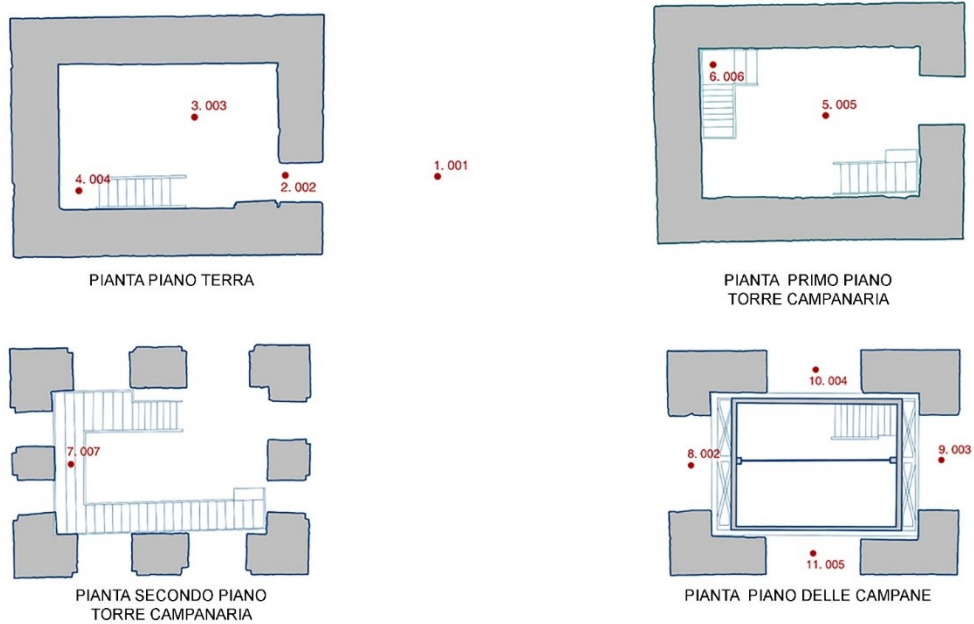


Figura 45 – Posizioni delle scansioni interne al Campanile di San Ciriaco

4.3.1.2. Generazione del modello FEM dalla nuvola di punti

La fase successiva all’acquisizione, a partire dall’allineamento delle singole scansioni registrate sul campo, costituisce il processo che porterà alla generazione di un modello utile per l’analisi e la valutazione strutturale.

Tale filiera rappresenta il centro nevralgico dello specifico caso studio e ha coinvolto diversi software utilizzati nelle varie fasi. La Figura 46 schematizza sinteticamente le varie tappe del processo dandone un quadro di insieme, di seguito si approfondirà ciascuna fase.

Il “sistema edificio”

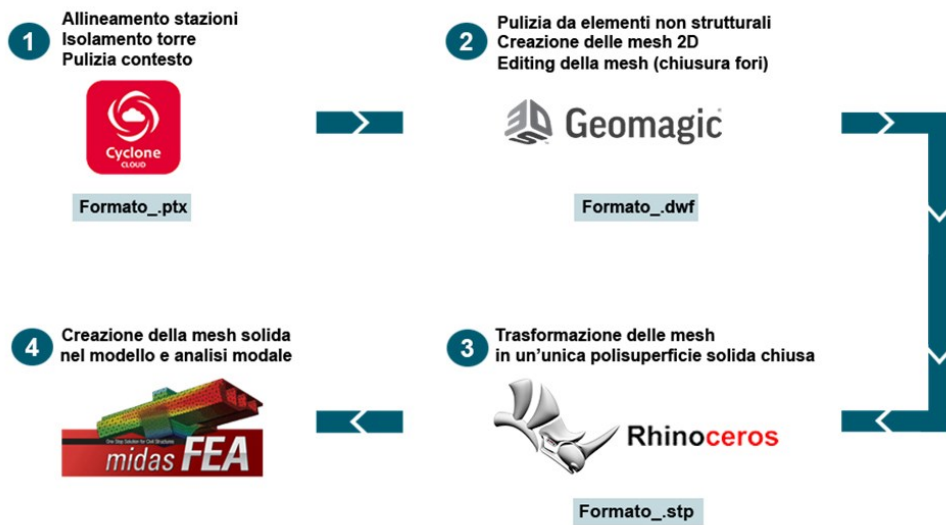


Figura 46 -Workflow per la generazione di un modello FEM a partire dalla nuvola di punti

4.3.1.2.1. Allineamento delle singole scansioni

Dopo la prima fase di acquisizione, si è proceduto alla fase di registrazione e allineamento della nuvola di punti tramite il software proprietario del Laser scanner: Leica Geosystem HDS Cyclone.

La nuvola completa, compreso il piazzale esterno e i prospetti della chiesa, risultante dall'allineamento delle 29 stazioni, ha un errore massimo di 4 mm (3 mm dovuto allo strumento e 1 mm dovuto all'allineamento).

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector	Group Error	Group Error Vector	Group	
39C	Cloud/Mes...	Station-001-C1...	Station-002-C1...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	0.001 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-001-C1...	Station-010-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.010 m]	0.000 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-001-C1...	Station-010-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.010 m]	0.000 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-001-C1...	Station-008-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.012 m]	0.000 m	aligned [0.012 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-001-C1...	Station-006-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.010 m]	0.000 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-001-S...	Station-002-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.007 m]	0.001 m	aligned [0.007 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-002-C1...	Station-003-C1...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	0.000 m	aligned [0.008 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-002-S...	Station-003-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.007 m]	0.001 m	aligned [0.007 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-003-C1...	Station-004-C1...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	0.000 m	aligned [0.008 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-003-S...	Station-004-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.008 m]	0.000 m	aligned [0.008 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-003-S...	Station-005-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.009 m]	0.000 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-005-C1...	Station-001-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.002 m	aligned [0.007 m]	0.000 m	aligned [0.007 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-005-C1...	Station-006-C1...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.007 m]	0.000 m	aligned [0.007 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-005-S...	Station-007-C1...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.005 m	aligned [0.011 m]	0.008 m	aligned [0.011 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-006-S...	Station-007-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.009 m]	0.001 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-007-S...	Station-022-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	0.001 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-010-S...	Station-009-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.012 m]	0.000 m	aligned [0.012 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-011-S...	Station-012-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.006 m]	0.000 m	aligned [0.006 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-011-S...	Station-010-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	0.001 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-013-S...	Station-014-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.010 m]	0.000 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-013-S...	Station-003-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	0.000 m	aligned [0.008 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-014-S...	Station-015-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	0.001 m	aligned [0.010 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-015-S...	Station-020-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	0.000 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-015-S...	Station-016-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	0.273 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-016-S...	Station-017-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.009 m]	0.000 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-018-S...	Station-017-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.009 m]	0.001 m	aligned [0.009 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-019-S...	Station-018-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.006 m]	0.000 m	aligned [0.006 m]	Group 1
39C	Cloud/Mes...	Station-024-S...	Station-010-S...	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	0.001 m	aligned [0.011 m]	0.000 m	aligned [0.011 m]	Group 1

Figura 47 - Constraint List con elenco stazioni e relativo errore di allineamento

Il passo successivo è stato quello di isolare la torre dall'intera nuvola, rimuovendo tutti i punti che non le appartenevano. (Figura 7)



Figura 48 - Nuvola di punti del Campanile di San Ciriaco

Il “sistema edificio”

4.3.1.2.2. Operazioni in Geomagic©

Le operazioni più dispendiose dal punto di vista del consumo di tempo sono state quelle effettuate all'interno del software Geomagic©.

La prima operazione effettuata è stata quella della pulizia della nuvola da tutti gli elementi non strutturali (scale in acciaio, campanili, ringhiere, ecc.). Al termine di questa operazione si ottiene una nuvola di 1 995 824 punti. Il passaggio successivo è rappresentato dalla trasformazione della nuvola di punti in una mesh di superficie.

La mesh ottenuta è una superficie aperta poiché mancano porzioni di muratura che in fase di acquisizione si trovavano in zone d'ombra, a causa della presenza degli elementi non strutturali rimossi nella fase precedente.

Le parti di mesh mancanti vengono ripristinate tramite il comando "fill hole" presente nel software.

Per problemi di interoperabilità è quindi necessario eseguire il comando "Mesh doctor" di Geomagic © che risolve automaticamente problemi di geometria (come autointersezioni, presenza di picchi, piccoli fori ...) che renderebbero il file illeggibile in diversi software , se non riparato.

Questo comando, però, tende a semplificare ed ad uniformare eccessivamente la geometria ai fini ultimi dello studio, che si ricorda vuole automatizzare il processo di generazione del modello strutturale mantenendo al tempo stesso il massimo della ricchezza del dato acquisito. Gli angoli retti vengono, infatti, eccessivamente arrotondati dall'esecuzione del comando “Mesh Doctor” pertanto, prima della sua esecuzione, vengono fissati i bordi sugli spigoli. (Figura 49.a)

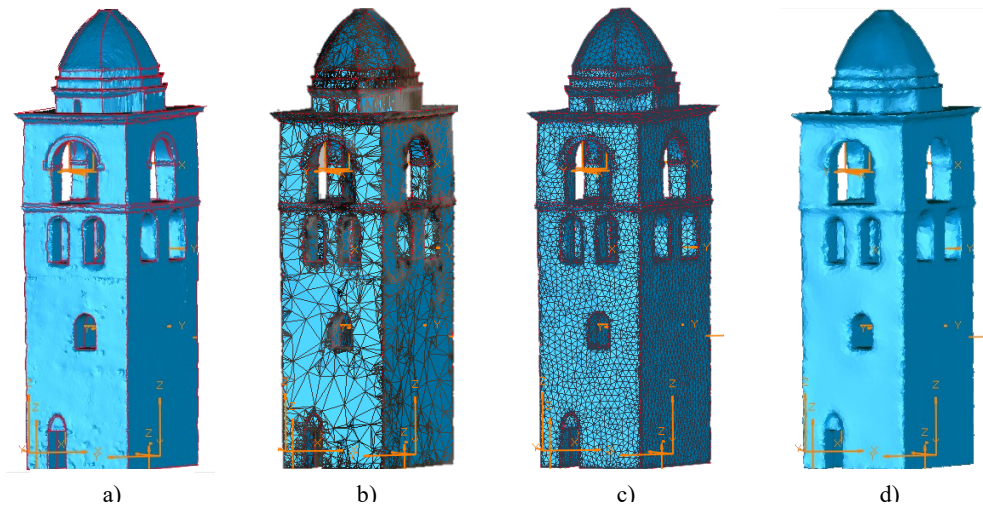


Figura 49 - Evoluzione della mesh all'interno del software Geomagic ©:
 a) Mesh con bordi rossi che non verranno modificati durante le operazioni di editing della mesh; b) mesh decimata di 100 000 triangoli; c) Mesh con triangoli dalla forma e dimensioni regolari; d) Mesh finale (62684 triangoli)

Attualmente, il numero di mesh del modello è un limite per quasi tutti i software di calcolo, quindi è necessario ridurre il numero di triangoli che costituisce la mesh, attraverso l'operazione di decimazione.

Si è proceduto per tentativi fino a trovare il modello con il maggior numero di mesh che ha una buona interoperabilità con gli altri due software, Rhinoceros e Midas FEA ©: partendo dal test di 30.000 triangoli, i test sono passati a 50.000, 60.000, 100.000 fino a 120.000 triangoli. Dopo la correzione del modello, i tentativi di importazione in software dedicati all'analisi strutturale sono ottimi per decimazioni fino a 100.000 mesh (Figura 49.b), mentre non forniscono risultati per il modello con la decimazione di 120.000 triangoli.

Decimato il modello del campanile si procede nuovamente alla correzione Mesh Doctor.

Grazie ai primi tentativi fatti in Midas © si è osservato che, con i solidi modellati in questo ambiente software, l'oggetto viene suddiviso in elementi regolari 3D. Per rendere il modello più pratico e semplificare il lavoro di calcolo della creazione di una mesh 3D in Midas FEA ©, è necessario regolare la forma e le dimensioni delle mesh 2D nel software Geomagic ©.

Il comando "Ricrea Mesh" converte mesh poligonali grossolane in mesh uniformi, crea triangoli di forma molto regolare. (Figura 49.c)

Il “sistema edificio”

Come già accennato in precedenza, il software Midas FEA © non supporta bene gli spigoli vivi della mesh, quindi vengono eliminati tutti i bordi rossi, creati per evitare un'eccessiva approssimazione durante le fasi di correzione. Successivamente, la regolarizzazione e la levigatura del modello sono obbligatorie per l'esportazione in FEA (comando “QuickSmooth”).

Al termine di tutte le operazioni sopra descritte si ottiene un modello costituito da 62.684 mesh. (Figura 49.d)

Terminate le operazioni in Geomagic © (Figura 50), il modello viene esportato in formato .stl (binario), compatibile con il software Rhinoceros.

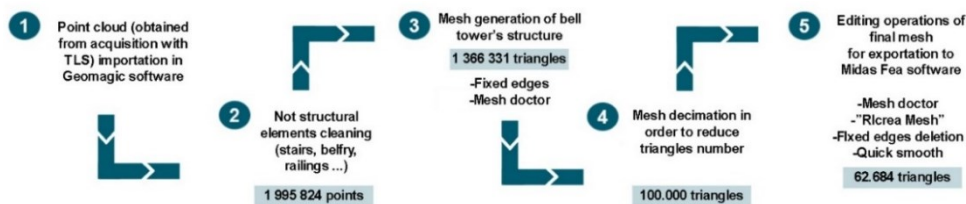


Figura 50 – Riepilogo delle operazioni in Geomagic©

4.3.1.2.3. Operazioni in Rhinoceros©

L'obiettivo è quello di ottenere un modello solido partendo dalla mesh superficiale chiusa ottenuta dalle operazioni eseguite in Geomagic©.

Questo passaggio è possibile grazie al software Rhinoceros che svolge il ruolo di ponte tra Geomagic © e Midas FEA ©.

Il file .stl viene importato in Rhinoceros che identifica l'oggetto importato come mesh. Con il comando "MeshANurb" la mesh si trasforma in una polisuperficie chiusa pronta per essere esportata.

La polisuperficie chiusa viene esportata con estensione STEP (.stp) che è uno dei formati individuati dal software Midas © per l'importazione dei modelli.

4.3.1.2.4. Importazione in Midas©

Il modello viene importato nel software Midas FEA © nell'ambiente di modellazione.

Il file .stp importato viene identificato come un solido pertanto il generatore di mesh 3D integrato al software integrato nel software che crea una mesh 3D composta da tetraedri solidi che riempiono il volume dell'oggetto.

Il comando "Auto-Mesh", in meno di tre ore, ha generato una mesh tridimensionale composta da 251.799 elementi e 60.256 nodi. (Figura 51)

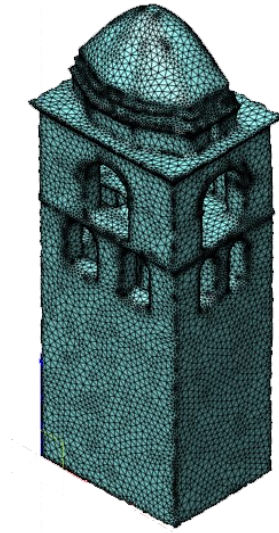


Figura 51 – Mesh 3D generate dal software Midas FEA©

4.3.1.3. Analisi modale

Ottenuto il modello sul quale eseguire le simulazioni e le analisi strutturali, sono stati assegnati al modello i vincoli ed i carichi: il peso del campanile e il peso degli elementi che lo costituiscono.

Per una prima analisi dei risultati con il modello importato si è deciso di utilizzare il modello non diviso applicandogli un solo materiale: la “calcarenite”, materiale prevalente nella costruzione. Una volta applicati i carichi, è stata effettuata la valutazione della combinazione sismica al fine di identificare: modi di vibrazione più significativi, il periodo di oscillazione e la relativa massa modale partecipante.

Il “sistema edificio”

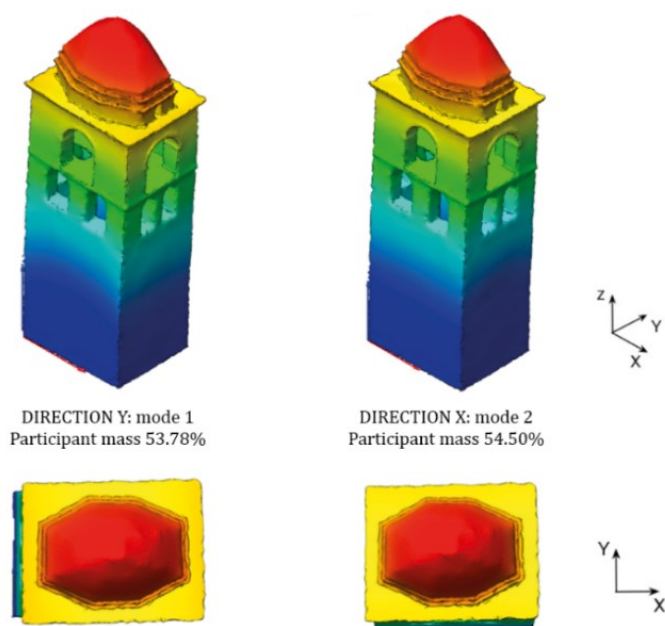


Figura 52 – Forme modali di vibrazioni principali con relative masse partecipanti

4.3.1.4. Risultati e considerazioni

Nell'approccio proposto in questo caso studio, il modello mantiene con successo le informazioni metriche, con un livello di dettaglio ben regolato.

D'altra parte, anche se il metodo proposto ha successo, rimangono problemi legati alla complessità del modello TLS. In generale, è stato ottenuto un buon equilibrio tra semplificazione del modello e problemi di interoperabilità.

Per validare il modello ottenuto dalla nuvola di punti sono stati confrontati due modelli: quello derivante dalla nuvola di punti e il modello FEM realizzato manualmente direttamente in Midas FEA.

Di seguito viene fornita una discussione sui risultati.

Sono state definite le prime quattro modalità di vibrazione della struttura, prestando attenzione alle modalità nelle 2 direzioni principali in pianta ed estraendo le masse modali.

Questa analisi evidenzia che il modello generato manualmente direttamente all'interno del software FEM ha una maggiore usabilità all'interno del programma stesso, perché meno complesso, ma va sottolineato che nasce da una forte semplificazione della realtà.

Al contrario, il modello derivato dalla nuvola, mantenendo un elevato livello di dettaglio, è un modello molto complesso, quindi non consente la segmentazione del modello e la conseguente possibilità di assegnare materiali diversi in base all’intero modello che sarà quindi monomateriale.

Confrontando le forme modali di vibrazione dei due modelli queste risultano uguali. Questo è un risultato confortevole poiché indica che i due modelli hanno lo stesso comportamento dinamico. Quantitativamente sarà necessario calibrare i due modelli confrontandoli con le misure ottenute dall’Operational Modal Analysis (OMA), al fine di valutare quale dei due modelli è in grado di avvicinarsi alle misure sperimentali. L’Operational Modal Analysis (OMA) è una tecnologia di monitoraggio in grado di stimare gli stessi parametri modali (forma, frequenza...) delle tecniche tradizionali conosciute. L’idea di base è fare un’analisi modale senza conoscere e / o controllare l’eccitazione degli input.

Il confronto è riportato in Tabella 1.

Forme modali	Frequenze OMA	Frequenze Modello TLS	Frequenze FEM classico	Δf OMA-Modello TLS	Δf OMA-FEM Classico	Δf Modello TLS – FEM classico
1	3,354	3,30331	3,30311	1,51%	1,52%	0,01%
2	4,143	4,10173	4,07538	1,00%	1,63%	0,64%
3	7,675	8,14784	7,99433	-6,16%	-4,16%	1,88%
4	10,187	11,5915	11,0741	-13,79%	-8,71%	4,46%

Tabella 1 – Confronto tra le frequenze dei due modelli FEM con i risultati sperimentali derivati dall’OMA

Dal confronto per le prime due frequenze, entrambi i modelli si avvicinano ai valori delle misure sperimentali OMA con un errore al di sotto del 5%, mentre le altre due si discostano maggiormente. Questo accade poiché per avere una calibrazione migliore e più precisa è necessario andare a caratterizzare maggiormente la struttura, considerando i reali materiali in gioco e le reali caratteristiche del manufatto.

Fermo restando che questo primo tentativo abbia tracciato un importante innovazione con discreti risultati, è evidente che ci sono ancora abbastanza migliorie da apportare. Tra queste è chiara la necessità di poter segmentare il modello al fine di ottenere risultati ancora più soddisfacenti dalla validazione sperimentale.

4.3.2. Torre del Borgo – Recanati (MC)

Le conclusioni cui si è giunti nel precedente caso studio sono state le premesse per il secondo caso studio: la Torre del Borgo a Recanati, in provincia di Macerata.

La torre è situata in Piazza Giacomo Leopardi e rappresenta la torre civica del paese.

Si eleva per una altezza complessiva di 35,50 m e si sviluppa su una pianta pressoché quadrata con lato di circa 9 metri.

L’accesso è situato sul lato est in asse con la residenza comunale: inizialmente i due volumi costituivano un unico edificio. Durante gli interventi di restauro del 2015, infatti, è stata rinvenuta una porta murata al secondo livello che probabilmente ne costituiva l’unico ingresso e allo stesso tempo il collegamento con il palazzo civico.

All’interno si possono distinguere sette livelli, tutti ricoperti da una volta a botte a eccezione della cella campanaria, avente volta a crociera, e della terrazza. Ai vari ambienti si è introdotti tramite delle ripide scalinate ricavate all’interno della muratura perimetrale che raggiunge spessori decisamente considerevoli, in alcuni punti ben oltre i 2 m. Solo in corrispondenza degli ultimi due piani si accede tramite una scala in acciaio.

La torre è coronata da una merlatura ghibellina, sorretta da beccatelli sporgenti, che delimitano un suggestivo terrazzo panoramico.



Figura 53 – Foto panoramica di Piazza Giacomo Leopardi. Sulla sinistra la Torre del Borgo, sulla destra il Palazzo Comunale

4.3.2.1. La campagna di rilievo

La progettazione vera e propria della campagna di rilievo è avvenuta in sito: una ricognizione della piazza e una valutazione di tutte le possibili angolazioni ha permesso di scegliere le posizioni più convenienti dalle quali acquisire le scansioni.

La morfologia della piazza e l’inserimento della torre nel contesto permettono di ottenere facilmente informazioni sui prospetti est e sud ai quali sono rivolte quattro scansioni, mentre i lati nord e ovest, data la vicinanza con i palazzi prospicienti, sono stati rievati ciascuna da una sola scansione.

Per allineare le scansioni interne con quelle esterne è stato posizionato un target (*L-02*) in linea con l’ingresso, in modo tale da risultare un elemento in comune per le stazioni *S-003*, *S-004* e *S-007*.

L’intero rilievo è stato realizzato attraverso due campagne realizzate in giorni diversi e con due diversi Laser scanner.

La prima campagna, eseguita con un Leica Scan Station P40, conta 20 scansioni. Sono stati così acquisiti i quattro prospetti esterni ed i primi sei livelli interni.

In questa prima campagna i target sono stati utilizzati anche per ottimizzare la successiva fase di allineamento delle scansioni (in Figura 54 e Figura 55 i target sono rappresentati da cerchi azzurri).

La seconda e ultima campagna di rilievo è stata realizzata con un Leica RTC 360 che ha completato la scansione degli ultimi due livelli interni e della terrazza sul tetto: sono state acquisite altre 23 scansioni.

Le figure seguenti mostrano il riepilogo dell’intera campagna di indagine svolta: la Figura 54 mostra le scansioni esterne e la Figura 55 quelle interne).

Il “sistema edificio”

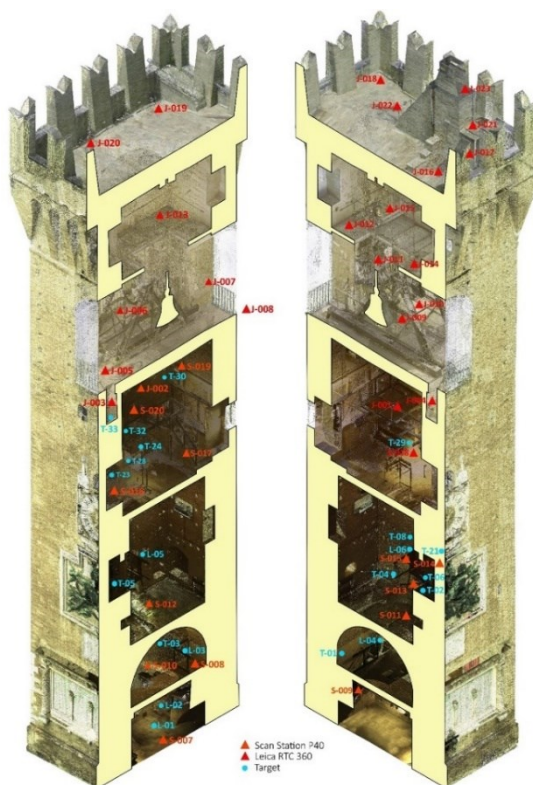


Figura 54 – Torre del Borgo - Scansioni esterne Figura 55 – Torre del Borgo – Scansioni interne

4.3.2.2. Generazione del modello FEM dalla nuvola di punti

4.3.2.2.1. Allineamento delle singole scansioni

Le 53 stazioni di acquisizione sono state allineate con il software proprietario degli scanner Leica Geosystem HDS Cyclone: si hanno complessivamente 996.197.028 punti (Tabella 2), che rappresentano non solo la torre ma anche l'intera piazza e i prospetti degli edifici limitrofi, poiché raggiunti dalla portata del laser scanner (Figura 56 -Torre del Borgo – Nuvola di punti complete di Piazza Giacomo LeopardiFigura 56).

Stazione	N° di punti
S01	9464654
S02	14561164

Stazione	N° di punti
J01	39170422
J02	9868441

S03	13357724	J03	34232522
S04	12158910	J04	33533602
S05	13905236	J05	36120747
S06	11655208	J06	34783451
S07	28101903	J07	33538603
S08	14690240	J08	35622065
S09	14533332	J09	35415606
S10	14503947	J10	34797017
S11	14475980	J11	35141355
S12	14229540	J12	39131120
S13	14318663	J13	38711747
S14	14447024	J14	38746914
S15	14668001	J15	34477249
S16	14653702	J16	31421174
S17	14580719	J17	27377218
S18	14573522	J18	23713184
S19	14740312	J19	25318080
S20	14399680	J20	26714751
		J21	20837268
		J22	18134753
		J23	17370278

Tabella 2 – Torre del Borgo - Scansioni e numero di punti per ciascuna di essa

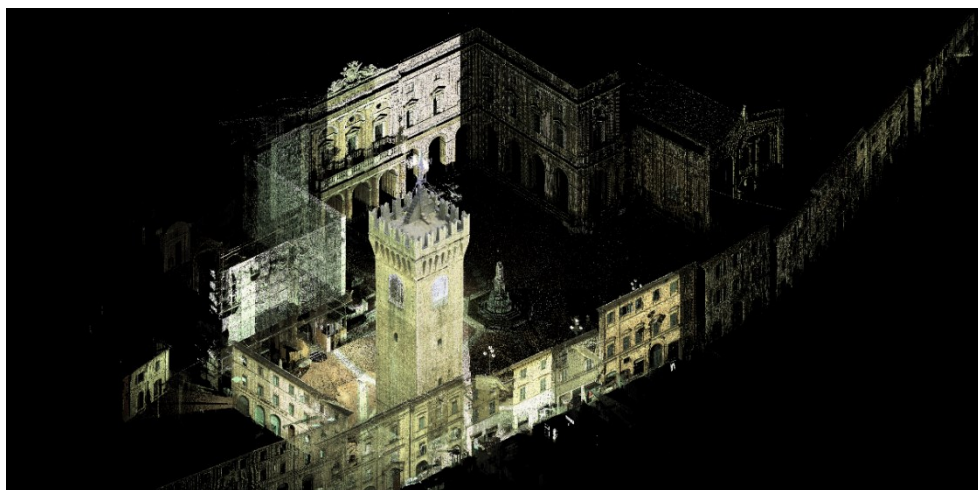


Figura 56 -Torre del Borgo – Nuvola di punti complete di Piazza Giacomo Leopardi

Il “sistema edificio”

4.3.2.2.2. Operazioni in Geomagic©

Da Cyclone viene esportata esclusivamente la porzione di nuvola afferente la torre.

Una volta isolata, la nuvola di punti viene importata in *Geomagic Wrap*. Quest’ultima è ora costituita da un totale di 221.814.970 punti. (Figura 57)

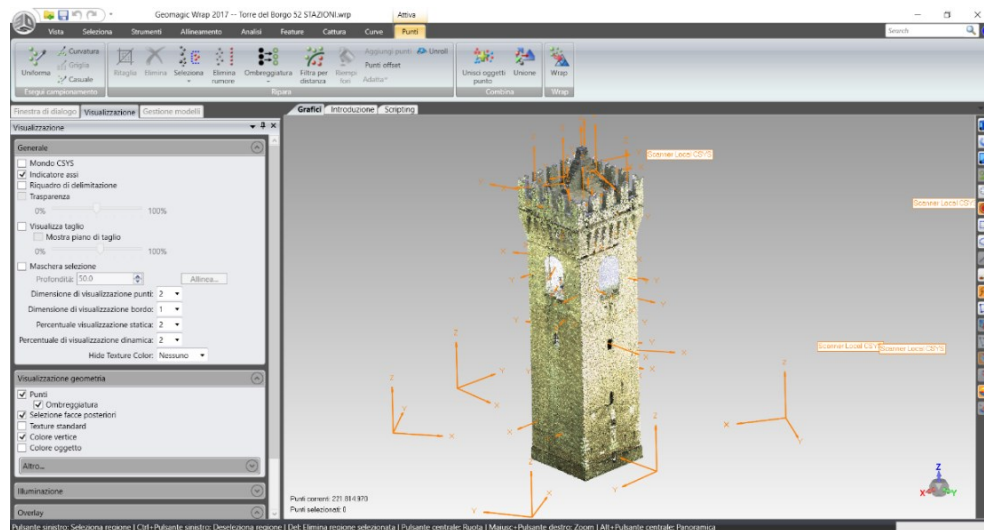


Figura 57 – Torre del Borgo – Nuvola isolate importata in Geomagic© Wrap

Nello step successivo si è proceduto alla pulizia della nuvola. Sono stati quindi eliminati tutti gli elementi non strutturali (ringhiere, arredi, impianti a vista, castello campanario in acciaio) e le nuove realizzazioni derivanti dal restauro del 2015, come il solaio in acciaio e vetro al livello 4 e il ballatoio a quota 3,

A seguito della pulizia, la nuvola è costituita da 168.006.926 punti. (Figura 58)

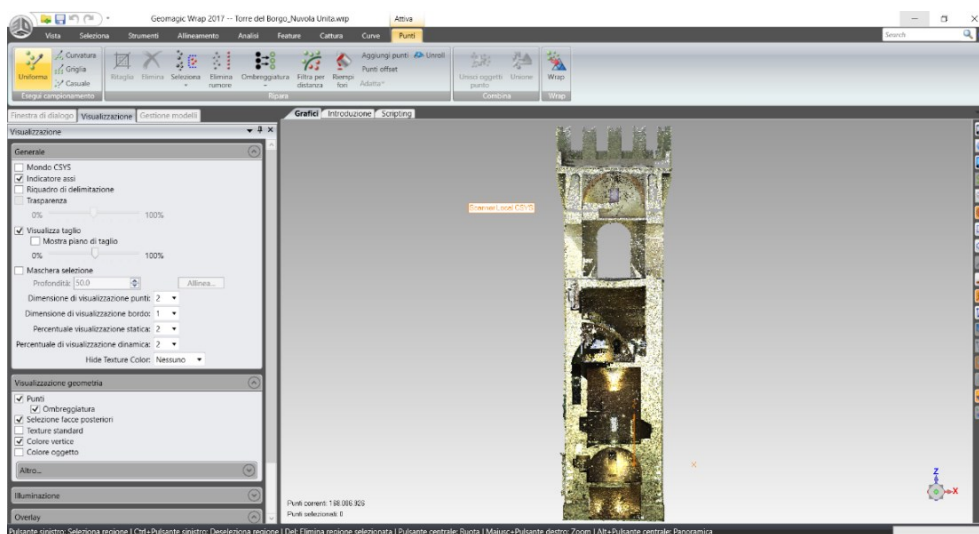


Figura 58 – Torre del Borgo – Nuvola pulita da tutti gli elementi non strutturali

Si prosegue con la creazione della mesh. (Figura 59)

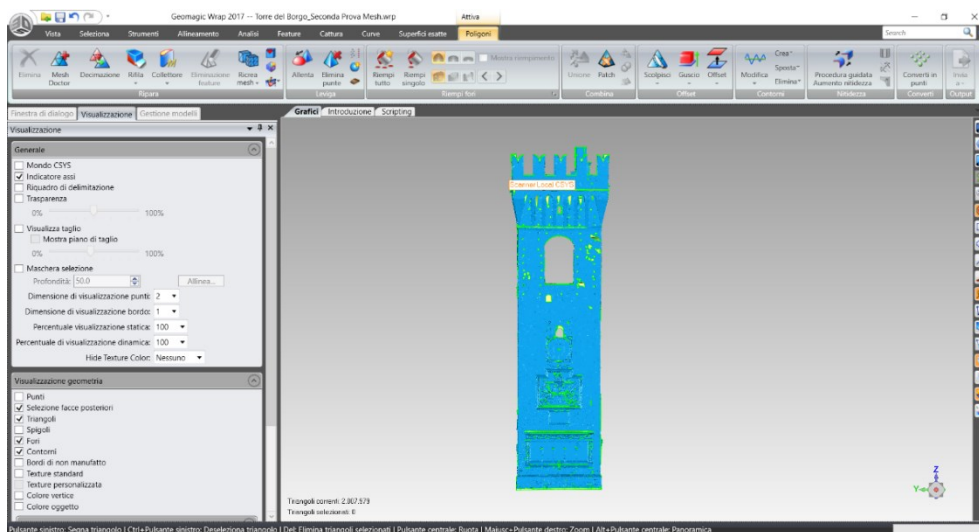


Figura 59 – Torre del Borgo – Generazione della mesh

Analogamente a quanto accaduto nel primo caso studio su San Ciriaco si è dovuto procedere nelle operazioni di chiusura della mesh nelle parti mancanti dovute alle zone d’ombra causate dalla presenza di elementi non strutturali successivamente eliminati.

Il “sistema edificio”

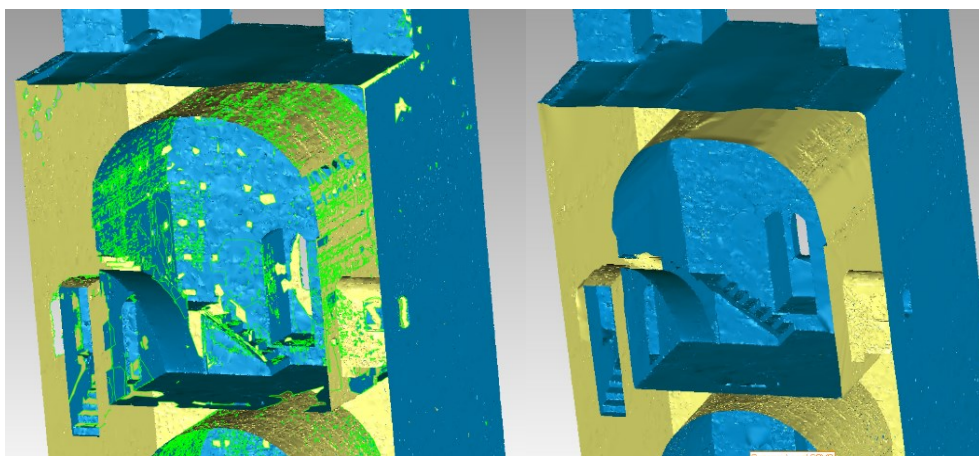


Figura 60 – Torre del Borgo – Pre e post chiusura dei buchi della mesh

Una volta rese uniformi e chiuse tutte le superfici corrispondenti alle murature e alle volte a botte, si definiscono i contorni, sia esterni che interni, per preservare gli spigoli e i dettagli che altrimenti verrebbero smussati nello step successivo.

Con l'applicazione del comando *Mesh Doctor*, si analizza e si cerca di ridurre tutte le patologie della *mesh*, quali ad esempio auto-intersezioni, bordi non *manifold*, punte e piccole componenti. Tale operazione ha il grande vantaggio di diminuire queste irregolarità e può essere ripetuta più di una volta, ma tende a levigare notevolmente gli spigoli.

L'iterazione del *Mesh Doctor* non ha portato all'azzeramento dei parametri sopracitati, anzi, alla soglia dell'undicesima ripetizione, si è verificata una perdita considerevole di dettaglio, in particolare in corrispondenza dei merli e dei beccatelli, caratteri distintivi della Torre del Borgo.

Pertanto ci si è arrestati con le iterazioni del comando *Mesh doctor* ad un risultato accettabile di definizione del dettaglio e si è proseguito con la fase successiva, comunque necessaria, della decimazione della *mesh*. È stata adottata questa scelta con la consapevolezza che la non risoluzione del problema avrebbe inficiato il buon esito finale di importazione del modello nel software di calcolo. Il problema sarà risolto a posteriori attraverso l'utilizzo di un altro software.

La *mesh* viene quindi decimata, ottenendo un numero complessivo di 60.102 triangoli. (Figura 61)

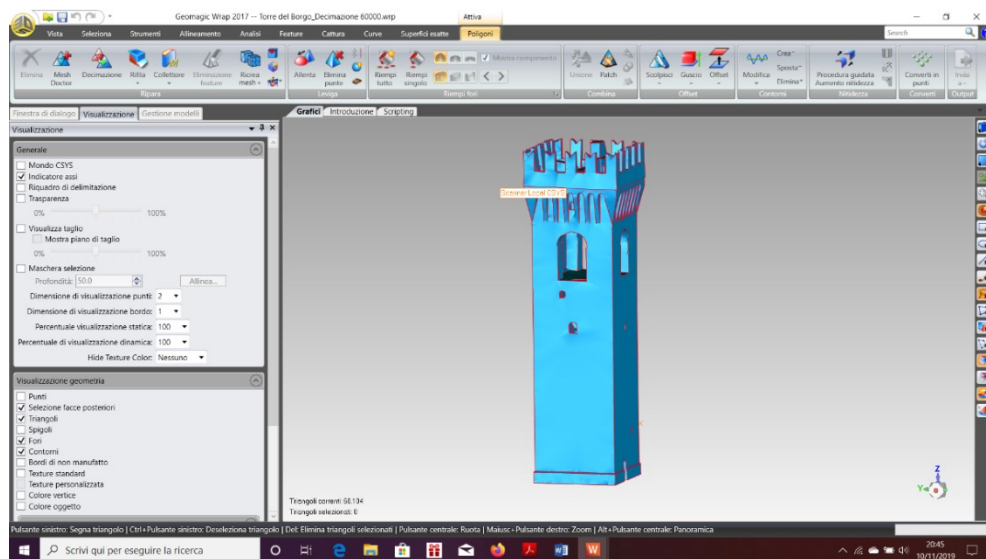


Figura 61 – Torre del Borgo – Mesh decimata

Sulla base dell’esperienza pregressa nel caso studio di San Ciriaco (cfr paragrafo 4.3.1.2.2) si procede con l’ultimo step. Il comando “Ricerca Mesh” converte le mesh poligonali grossolane in mesh uniformi e la mesh finale conta 78.592 triangoli.

La mesh così ottenuta, come anticipato, conserva ancora delle irregolarità che non possono essere superate con gli strumenti che il software *Geomagic* mette a disposizione. Infatti, ogni tentativo di importazione in Midas a partire da questo modello è risultato fallimentare.

Pertanto si sceglie di sperimentare un software diverso per ottimizzare le problematiche riscontrate.

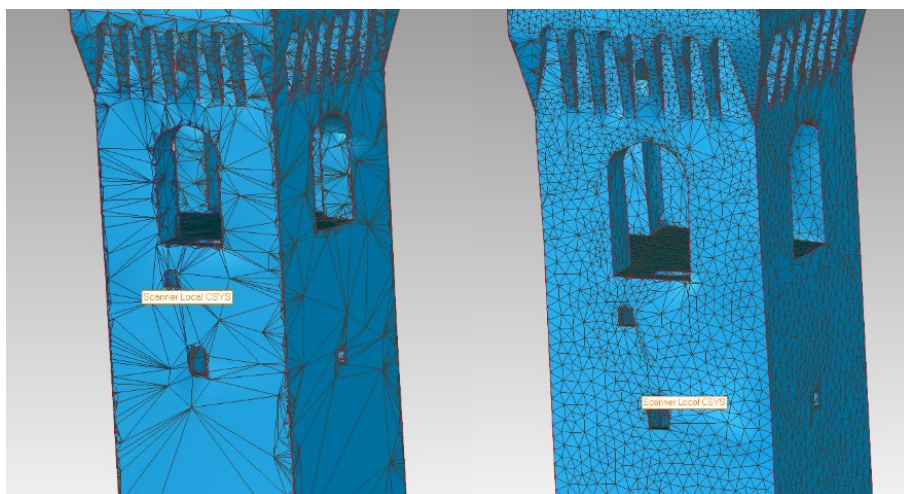


Figura 62 – Torre del Borgo – Mesh prima (a sinistra) e dopo (a destra) del comando “Ricrea mesh”

4.3.2.2.3. Ottimizzazione in 3DReshaper©

Il software *3DReshaper*© ha funzioni analoghe a *Geomagic Wrap*©, ma si è rivelato uno strumento più potente poiché ha permesso la risoluzione di tutte le anomalie non risolvibili al suo interno.

Attraverso il comando “*Ripara mesh*” (analogo comando del “*mesh doctor*” di *Goemagic*) è stato possibile correggere automaticamente tutte le irregolarità della *mesh*.

Tale ultima operazione ha però introdotto una leggera semplificazione del modello con conseguente perdita di dettaglio. Nella Figura 63 è riportato un confronto tra il pre e post operazione nella zona di dettaglio dei merli e dei beccatelli della torre.

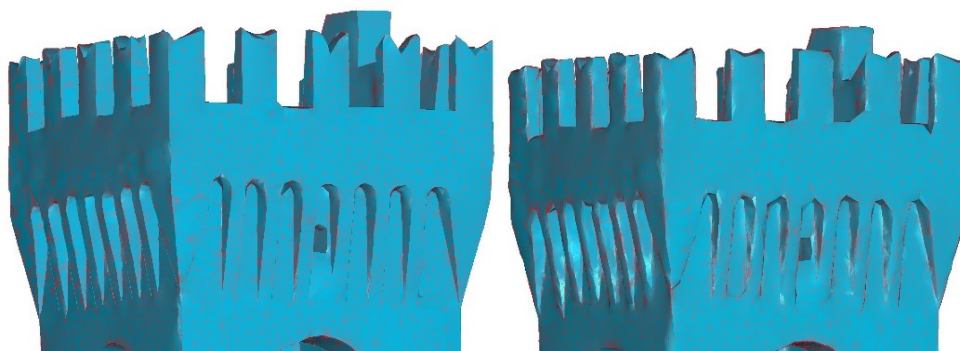


Figura 63 – Torre del Borgo – Mesh prima (a sinistra) e dopo (a destra) del comando “Ripara mesh”

4.3.2.2.4. Operazioni in Rhinoceros©

La mesh è stata quindi esportata nel formato *.stl (binario)* compatibile con il software *Rhinoceros©*.

A seguito dell'importazione in Rhino si eseguono dei controlli per appurare l'effettiva validità della *mesh*: si controlla che le normali siano tutte orientate nella stessa direzione e la presenza di eventuali bordi aperti o *non manifold*.

Si è quindi proceduto, con il comando *MeshANurb*, alla conversione della *mesh* stagna in una polisuperficie chiusa.

La fase di conversione è così conclusa e si può esportare il file nel formato STEP, standard internazionale che consente lo scambio di definizioni complete di prodotti tra sistemi CAD (*Computer Aided Design*), CAE (*Computer Aided Engineering*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) differenti.

4.3.2.2.5. Operazioni in Autodesk Inventor©

Nonostante la poli superficie chiusa esportata da Rhino sia riconosciuta come solido in *Midas FEA*, ogni tentativo di realizzare una *mesh* solida 3D attraverso il generatore di mesh interno al software FEM risulta fallimentare.

Per ovviare a questa difficoltà, una soluzione efficace è risultata quella di dividere l'oggetto in quattro porzioni in modo da articolare l'operazione successiva in quattro passaggi.

Tale operazione è stata possibile grazie al software Autodesk Inventor all'interno del quale si è operata una segmentazione del modello unitario.

Il “sistema edificio”

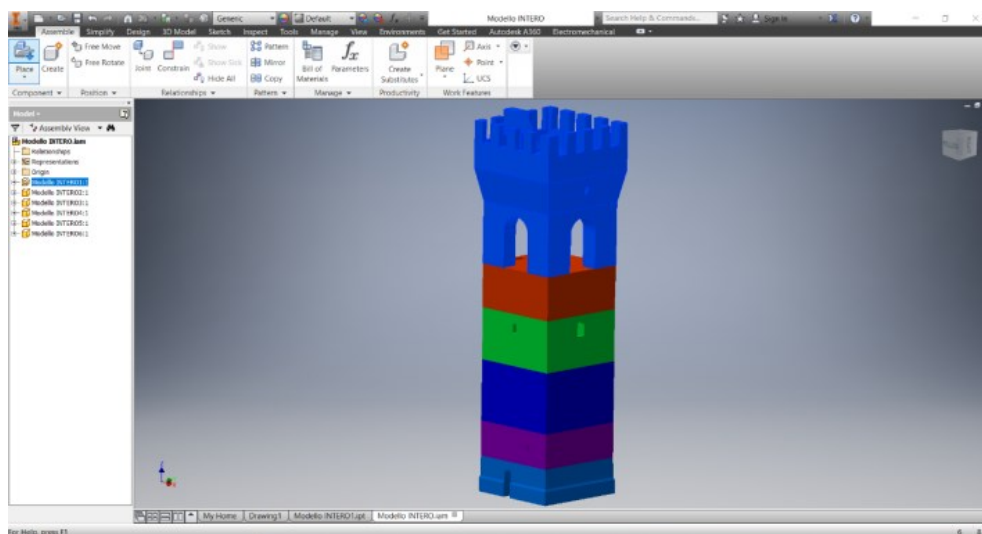


Figura 64 – Torre del Borgo – Modello segmentato in Autodesk Inventor©

4.3.2.2.6. Importazione in Midas©

Il modello così segmentato viene importato correttamente in Midas© e il generatore di mesh 3D interno al software discretizza correttamente il modello in elementi brick a cui è possibile assegnare le caratteristiche dei materiali costituenti. ()

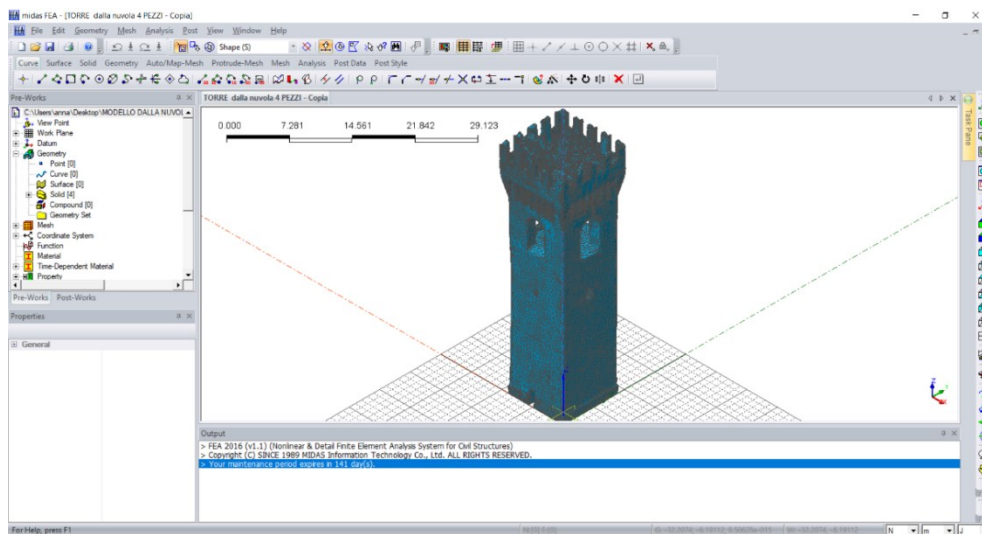


Figura 65 – Torre del Borgo - Modello correttamente importato in Midas FEA

4.3.2.3. Risultati e considerazioni

Il caso studio di Recanati ha messo in luce i limiti dell’iter sperimentale basato su un approccio iterativo e che comunque può avere risultati condizionati in modo significativo dalle caratteristiche contingenti del caso preso in esame.

Dall’altro lato si è potuto sperimentare la sostenibilità e la potenzialità del processo attraverso l’utilizzo di altri software.

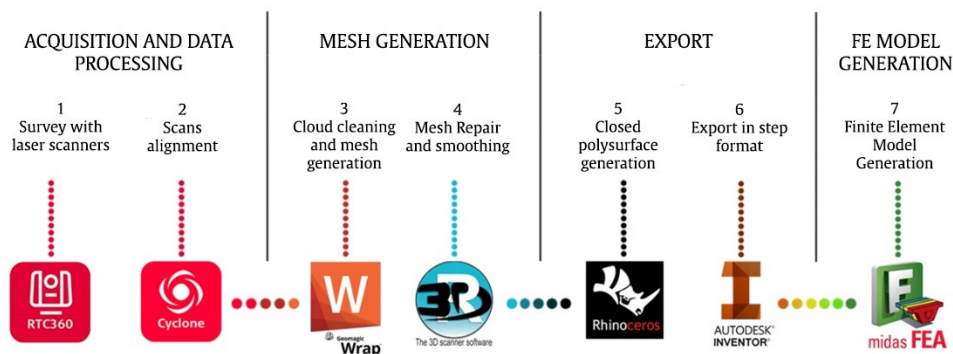


Figura 66 – Torre del Borgo – Workflow implementato

Inoltre la segmentazione del modello, seppur non coerente con la semantica, è una miglioria che il primo caso studio di San Ciriaco aveva evidenziato come necessaria.

4.3.3. Torre di San Ciriaco – Ancona (AN) – Ottimizzazione processo

Con la consapevolezza maturata nei vari tentativi succedutisi si è deciso di tornare sul primo caso studio affrontato e su di esso applicare tutte le ulteriori nuove migliorie da sperimentare. Per ovvi motivi non verrà riproposta la descrizione del caso studio e della fase di acquisizione dei dati (a meno di un piccolo perfezionamento della nuvola di partenza) ma ci si concentrerà sulla fase metodologica della generazione del modello FEM.

4.3.3.1. Il completamento della campagna di rilievo

4.3.3.1.1. L'acquisizione tramite Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Come è possibile notare dalla Figura 48 l'acquisizione realizzata attraverso la campagna di rilievo con Laser Scanner P40 (cfr Paragrafo 4.3.1.2.1) aveva permesso di ottenere una nuvola di punti carente di alcune porzioni della parte sommitale del campanile a causa delle zone d'ombra dovute alle acquisizioni realizzate da terra.

Per ovviare a tale mancanza si è optato ad una campagna fotografica realizzata con un dispositivo UAV al fine di poter ricostruire la nuvola della copertura attraverso la fotogrammetria.

Si è usato un drone DJI Spark munito di una fotocamera con un sensore di 1/2,3" (6,17x4,55 mm), un FOV (Field of View) pari a 85°, una lunghezza focale equivalente di 25 mm.

Sono state scattate 78 foto in formato jpeg con una risoluzione di 12 Mega pixel (3968 × 2976 pixel): il volo del drone ha seguito una traiettoria circolare attorno alla cupola (54 scatti) a cui sono state aggiunte 24 foto zenitali.

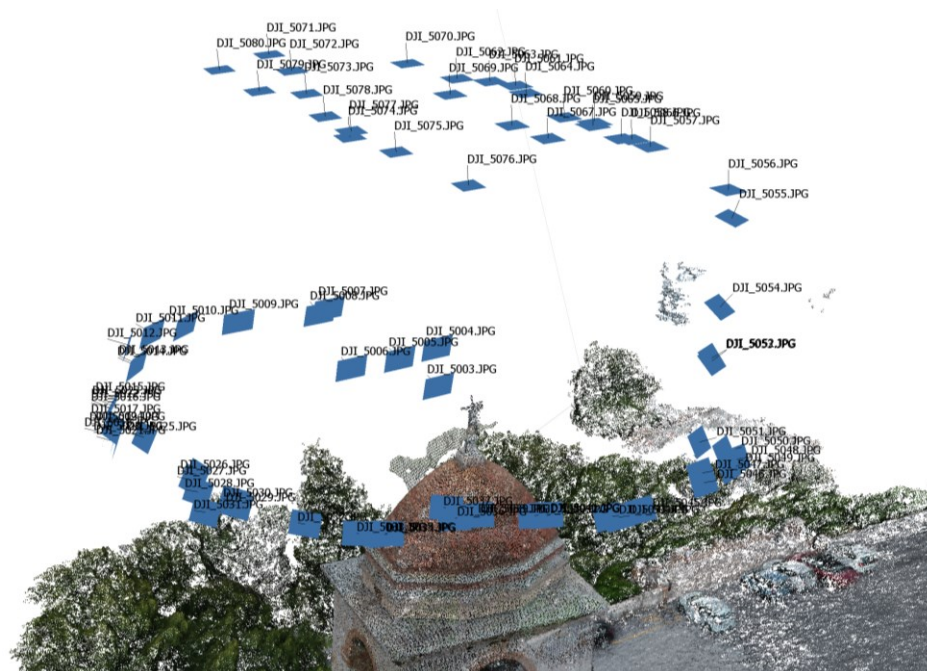


Figura 67 – Campanile di San Ciriaco – Posizione e orientamento delle camere

4.3.3.1.2. Le misurazioni interferometriche

Nell’ottica di integrazione dei dati e di collaborazione con il dipartimento di Strutture dell’Univpm, contestualmente alla campagna di acquisizione fotografica si sono effettuate misurazioni con il radar interferometrico IBIS-FS prodotto dalla IDS Georadar.



Figura 68 – Campanile di San Ciriaco – Radar interferometrico nella fase di acquisizione

Il “sistema edificio”

L’obiettivo era quello di testare lo strumento su questa tipologia di manufatto storico per sperimentare quanto i tentativi presenti in letteratura (vedi paragrafo 2.2.1) fossero effettivamente applicabili ai casi studio analizzati, nella fattispecie le torri in muratura.

L’obiettivo finale che ci si era posti era quello di desumere, a partire dalle misurazioni effettuate con il radar, le frequenze di vibrazione della struttura per poterle poi confrontare con le misure ottenute dalla campagna sperimentale realizzata con gli accelerometri posti direttamente a contatto con la struttura.

Sono state effettuate così due misurazioni ponendo lo strumento nelle direzioni dei due assi principali in pianta.

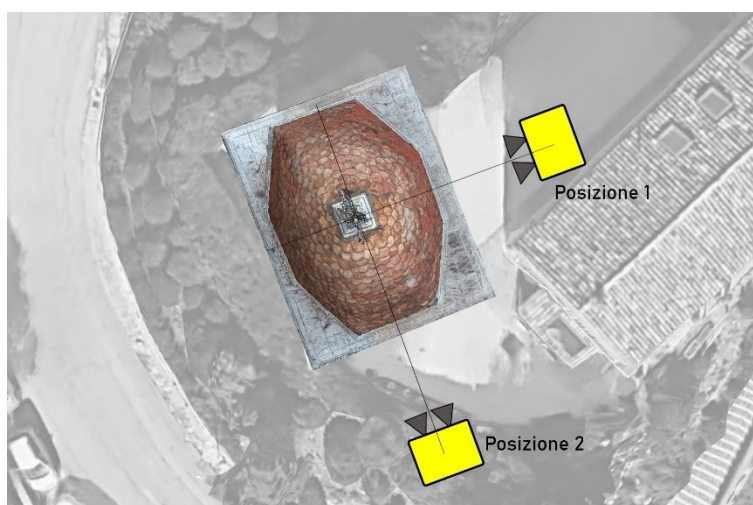


Figura 69 – Campanile di San Ciriaco – Posizione del radar nelle due acquisizioni

La prima acquisizione è stata realizzata in una condizione di “riposo” in cui le uniche sollecitazioni agenti sul campanile erano praticamente prossime allo zero (escluse le forzanti ambientali: traffico veicolare, praticamente nullo, e vento, ininfluenza per questo tipo di strutture).

La seconda acquisizione è stata realizzata partendo da una condizione di quiete che è stata interrotta dall’azionarsi del sistema campanario: l’oscillazione delle campane ha indotto una vibrazione della struttura che è stata ben apprezzata dallo strumento. L’acquisizione si è poi protratta fino al momento in cui la struttura è tornata alla condizione di quiete iniziale.

Ogni acquisizione ha avuto una durata di circa 20 minuti con una frequenza di campionamento di 200 Hz.

Per ogni acquisizione, i dati sono stati elaborati utilizzando il software commerciale IBIS DATAVIEWER che fornisce le time histories degli spostamenti a partire dai dati acquisiti dal sensore radar IBIS-FS.

Le asperità della superficie in pietra della torre garantiva punti con una buona riflettanza pertanto non è stato necessario installare corner artificiali per l’amplificazione del segnale.

In Figura 70 sono mostrati i picchi di riflettanza autoidentificati dal software.

È stato quindi scelto il range bin posto a 19 m sulla linea di vista dello strumento che corrisponde all'area del cornicione sommitale del campanile.

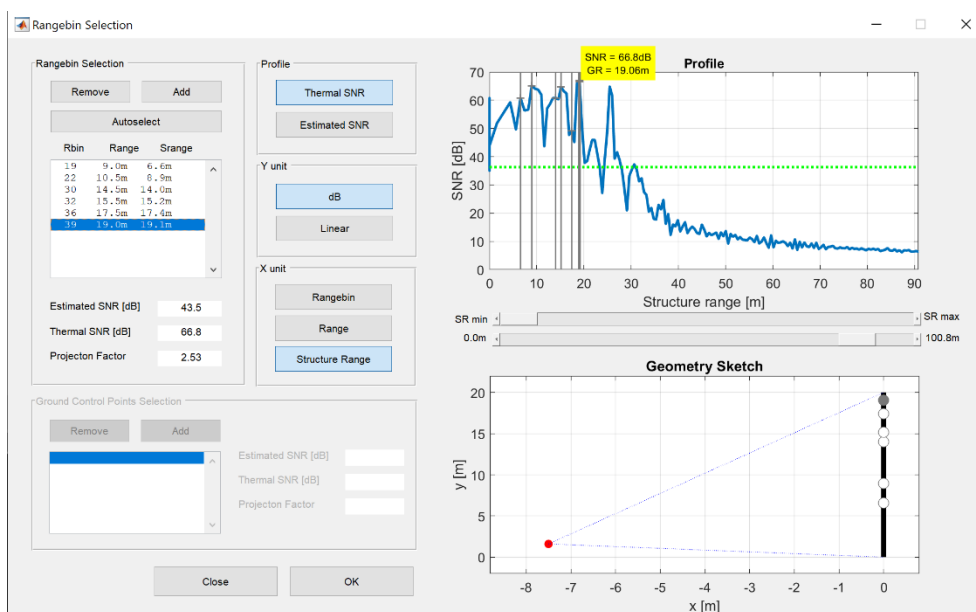


Figura 70 – Campanile di San Ciriaco – Individuazione dei picchi di riflettanza individuati dall’IBIS

Nella seconda acquisizione, durante la sollecitazione dovuta allo scampanio, lo spostamento lungo la Line Of Sight più grande è stato di 0,28 mm. Supponendo che questa maggiore oscillazione della torre sia lungo la componente orizzontale si è rilevato che lo spostamento orizzontale è stato di 0,68 mm.

Successivamente, è stata calcolata la trasformata discreta di Fourier (DFT) per valutare le frequenze di risonanza più importanti della struttura. La media e le tendenze lineari sono state rimosse da tutte le time histories degli spostamenti e la derivata è stata applicata prima dell'applicazione del DFT.

Il “sistema edificio”

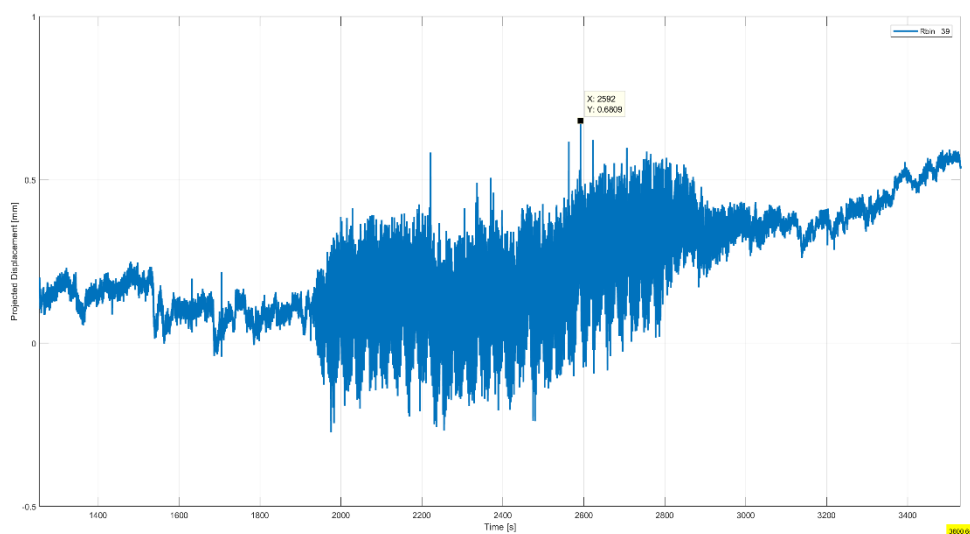


Figura 71 – Campanile di San Ciriaco – Diagramma degli spostamenti sull'asse orizzontale del range bin prescelto al trascorre del tempo

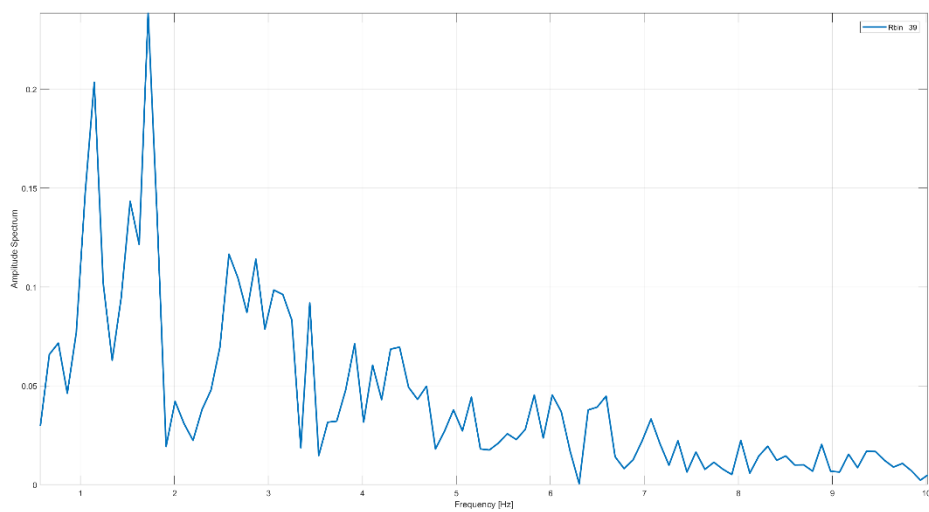


Figura 72 – Campanile di San Ciriaco – Spettro ottenuto dalla trasformata di Fourier

In Figura 71 è possibile osservare il movimento della parte del campanile: la fase iniziale di riposo, la fase centrale di massima sollecitazione dovuto all'azionarsi delle campane e la fase finale di recupero della condizione di quiete.

La Figura 72 mostra gli spettri ottenuti dalla trasformata di Fourier degli spostamenti.

Ciò che si aspettava erano dei picchi che marcatamente si innalzassero in corrispondenza dei valori di frequenza (sull'asse delle ascisse) che si erano ottenuti con la campagna sperimentale tramite accelerometri.

Probabilmente a causa della non eccessiva snellezza della struttura (lo spostamento massimo è infatti inferiore ad 1 mm) le aspettative a monte della sperimentazione con l'interferometro sono state disattese e non è stato quindi possibile individuare le frequenze proprie della struttura.

4.3.3.2. Generazione del modello FEM dalla nuvola di punti

4.3.3.2.1. Generazione della nuvola di punti completa

Per ottenere la nuvola dalle foto scattate da drone ci si è serviti del software Agisoft Metashape©.

La distanza media dall'oggetto varia da 12,5 m per le foto zenitali a 10,5 m per le foto diagonali, ottenendo un Ground Sample Distance (GSD) di 0,746 mm / pixel in direzione orizzontale e 0,734 mm / pixel in direzione verticale.

Tramite il software sono state effettuate le operazioni di allineamento delle camere (Figura 67) e di generazione della nuvola densa di punti.

La nuvola così ottenuta, che comprendeva anche punti dell'intorno non appartenenti alla cupola, è stata pulita isolando così i punti necessari a completare la nuvola già in possesso dell'intero campanile.

La fase successiva è stata quella dell'orientamento della nuvola: tramite l'utilizzo di 3 markers su punti comuni alle due nuvole (Figura 73), la cupola ottenuta da fotogrammetria è stata orientata secondo il sistema di riferimento della nuvola di punti ottenuta da TLS.

Il “sistema edificio”

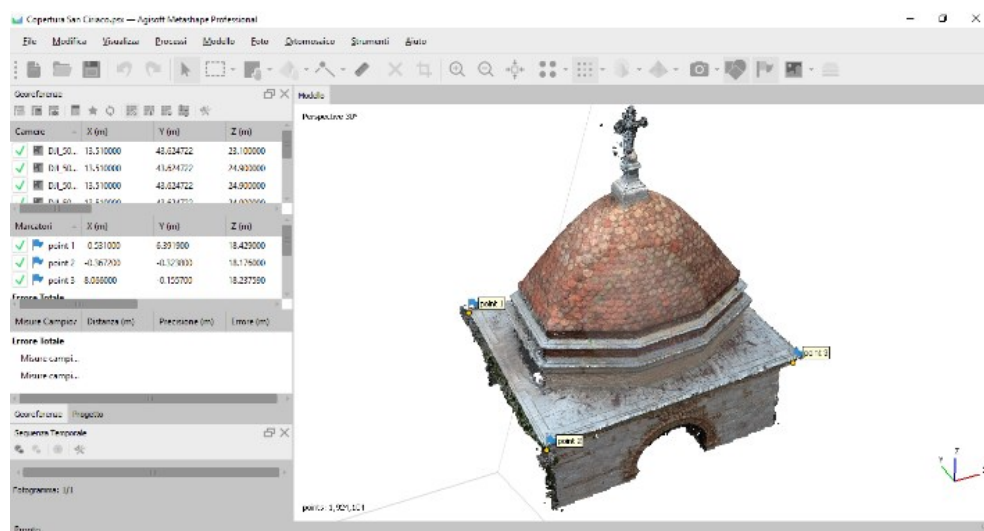


Figura 73 – Campanile di San Ciriaco – Markers sulla nuvola di punti della cupola

Le due nuvole sono state quindi importate in Geomagic Wrap© e unite per un numero complessivo di 23 756 115 punti. (Figura 74)



Figura 74 – Campanile di San Ciriaco – Nuvola di punti completa (TLS più fotogrammetria)

4.3.3.2.2. Generazione della mesh

Ottenuta la nuvola completa Il passo successivo consiste nella generazione della mesh dalla nuvola di punti.

Tale operazione è stata eseguita all'interno del software Geomagic Wrap© tramite il comando “Wrap mesh”.

La mesh ottenuta aveva dei buchi pertanto si è proceduto alla loro chiusura tramite il comando “riempi fori”. Al termine dell'operazione si è ottenuta una mesh stagna di 1 352 349 triangoli. ()

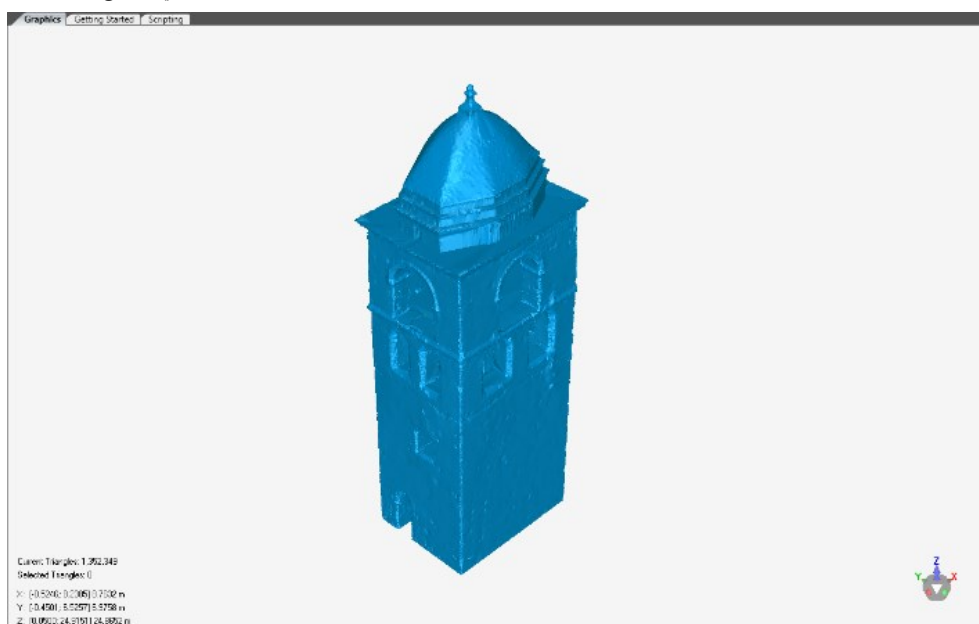


Figura 75 – Campanile di San Circao – Mesh stagna

Le operazioni all'interno di Geomagic Wrap© sono così concluse e si esporta la mesh con oltre un milione di facce, alla massima definizione.

Si vuole sottolineare questo fatto ponendolo a confronto con le filiere sperimentate nei casi studio precedenti. Il tentativo di alleggerire la mesh riducendone il numero di triangoli, all'interno di tali software che operano con una logica di facce triangolari, è risultato il passaggio che introduceva due fattori negativi: l'alto consumo di tempo e contemporaneamente l'introduzione di irregolarità che generavano problemi di interoperabilità tra software.

Questo workflow, che si è poi rivelato quello vincente, prevede la semplice trasformazione della nuvola in mesh.

Sarà la Retopology a risolvere tutti i problemi di interoperabilità e ad abbattere i tempi di generazione del modello.

Il “sistema edificio”

4.3.3.2.3. Retopology

La retopologia rappresenta uno degli aggiornamenti più importanti e determinanti nello studio di questa metodologia.

Quest' ultima consente di “aggiustare” la mesh, composta da milioni di triangoli, tenendo conto di due fattori fondamentali: la non uniformità del LOD (Level of Detail) e la quadrangolarità della mesh.

Il primo risultato consente di impiegare un diverso numero di facce sulla base del grado di dettaglio della porzione di superficie da discretizzare. Ciò è possibile assegnando una dimensione disuniforme alle patch della maglia della mesh, tenendo conto delle linee di tendenza della geometria (Figura 75).

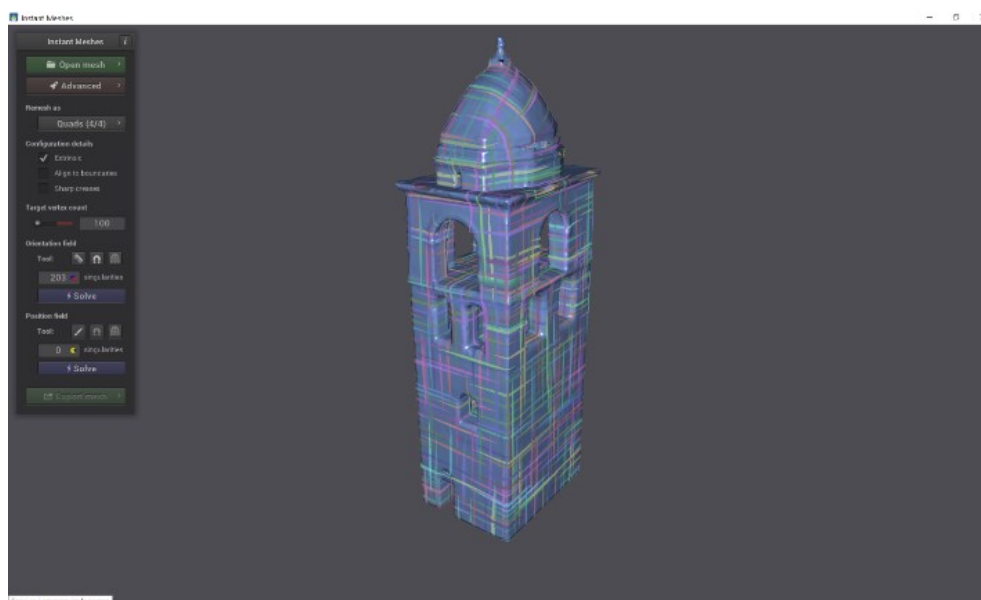


Figura 76 – Campanile di San Ciriaco – Retopology: Linee di tendenza

Ciò consente di avere un gran risparmio di numero delle facce della mesh potendo così ottenere un elevato LOD con un ridotto numero di facce.

Il secondo fattore riguarda la forma delle patch che non sono triangolari ma piuttosto costituite da 4 lati. Ciò ha un' implicazione fondamentale poiché le mesh quadrangolari sono le stesse che vengono utilizzate nel processo di generazione delle mesh 3D all'interno dei software FEM.

Le patch quadrangolari sono ottenute da una serie di curve NURBS in due direzioni (chiamate "U" e "V") interpolate per creare una superficie come prodotto tensoriale di due curve NURBS.

Nel caso in esame il software utilizzato è Zbrush© e la mesh (Figura 77) è stata ottenuta da quella originale, applicando il comando "ZRemesher".

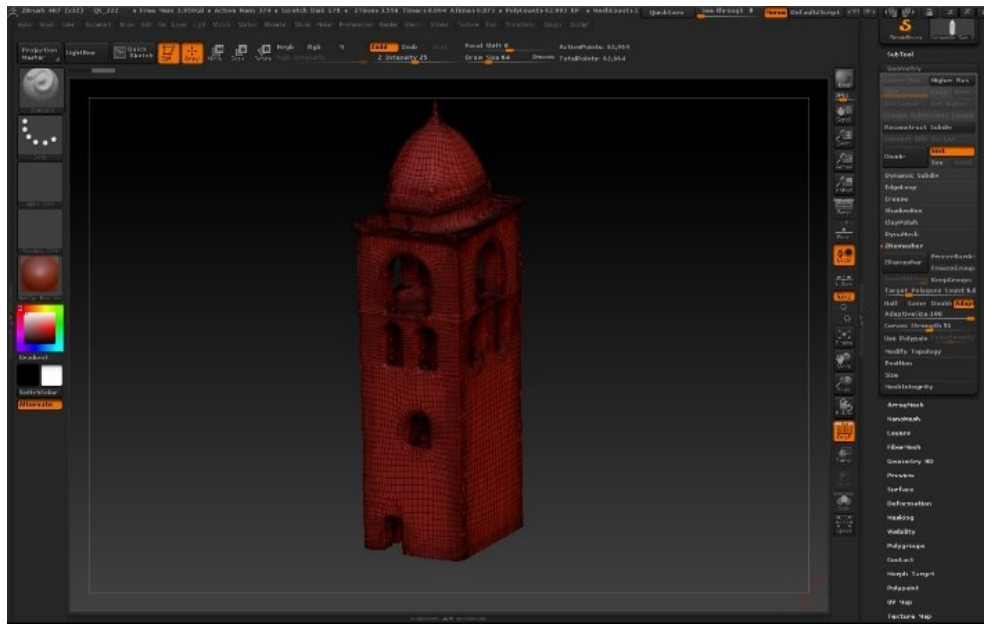


Figura 77 – Campanile di San Ciriaco – Zbrush©: comando Zremesher applicato alla mesh

4.3.3.2.4. Segmentazione del modello e generazione polisuperficie (Rhinocheros©)

Il passo successivo ha lo scopo di trasformare la mesh chiusa retopologizzata in un solido, da importare nell'ambiente FEM. Il software utilizzato è Rhinocheros©.

L'operazione è stata completata facilmente tramite il comando “meshAnurb”.

Il modello è stato quindi segmentato tenendo conto della semantica, del comportamento strutturale e dei materiali, utilizzando lo stesso software Rhino.

Per modellare adeguatamente la struttura, le pareti verticali sono state separate in due parti, secondo due cortine di materiale diverso (cfr paragrafo 4.3.1).

In Figura 78 un esploso delle varie parti del modello suddiviso.

Il “sistema edificio”



Figura 78 – Campanile di San Ciriaco: suddivisione del modello all'interno di Rhinoceros©

4.3.3.2.5. Importazione del modello in ambiente FEM

Il modello suddiviso è stato quindi importato nel software Midas FEA NX. Tramite il comando "automesh" i solidi sono stati discretizzati in tetraedri 3D.

Il risultato finale del processo è una mesh composta da 654 665 Elementi brick e 166 885 nodi. (Figura 79)

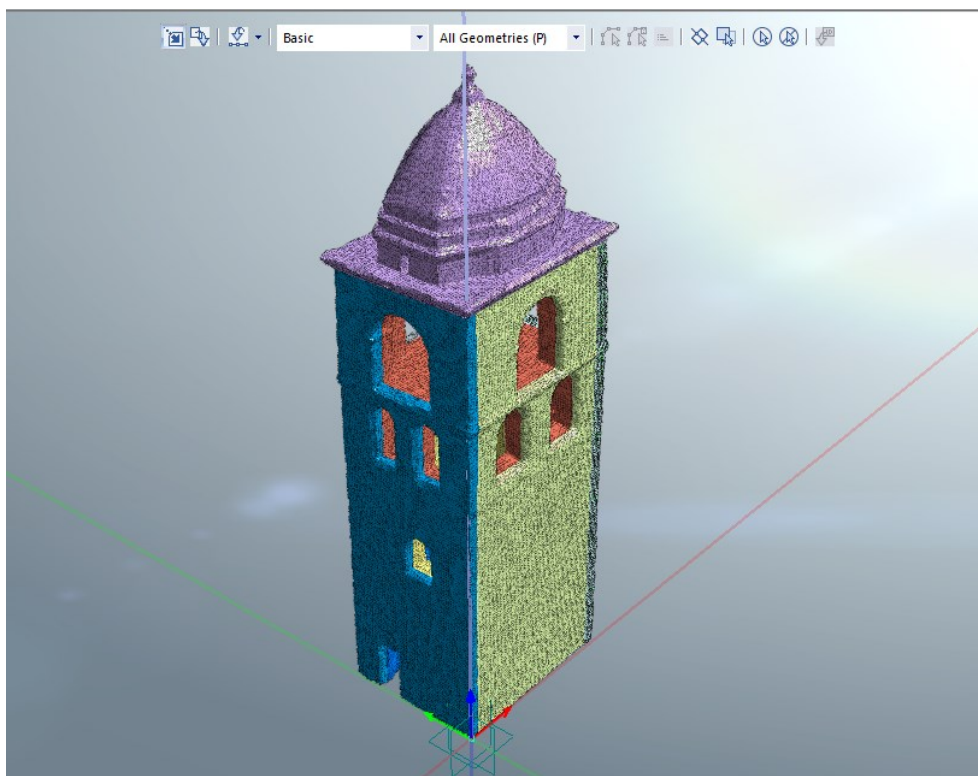


Figura 79 – Campanile di San Ciriaco – Modello discretizzato in Midas FEA NX

4.3.3.3. Caratterizzazione dinamica

Quando l'indagine tramite NMs è l'unica opzione disponibile, queste devono essere riprodotte il più fedelmente possibile. Sinora è stato affrontato il problema della fedel riproduzione della geometria all'interno dell'ambiente FEM, mentre i parametri dei materiali rimangono ancora una questione da affrontare.

I parametri dei materiali utilizzati per caratterizzare i modelli sono solitamente presi da codici locali, anche se questa semplificazione può non essere rappresentativa della realtà. L'esposizione a fattori ambientali, la presenza di crepe o interventi di ammodernamento possono modificarli in alcune parti della struttura. Poiché è assurdo effettuare prove sui materiali di composizione dell'intero edificio, sia per i loro costi che per preservare il valore artistico delle strutture, attualmente vengono utilizzate tecniche non invasive come l'Analisi Modale Operazionale (OMA). Con l'OMA si ottengono frequenze reali e forme modali per calibrare gli NMs agendo sui parametri dei materiali lineari. Già questa prima taratura dà un'idea dello stato di conservazione attuale dell'edificio.

Il “sistema edificio”

In questa sezione il FEM del campanile di San Ciriaco, ottenuto dalla nuvola di punti, è stato utilizzato per eseguire una calibrazione numerica basata sui dati sperimentali ottenuti da OMA.

4.3.3.3.1. Operation Modal Analysis

Per registrare le frequenze reali e le forme modali, il campanile è stato monitorato nelle condizioni operative utilizzando cinque accelerometri Piezo-MEMS triassiali (range dinamico 120dB, sensibilità 1 V / g, range di frequenza 0,8-100 Hz) collegati con un Sinchub per la sincronizzazione (Ribilotta et al., 2018). La campagna sperimentale consisteva in quattro misurazioni () in cui due accelerometri sull'ultimo piano accessibile sono stati mantenuti fissi, mentre i restanti sono stati spostati in altre posizioni per raccogliere una maggiore quantità di dati e avere una migliore caratterizzazione dinamica. Ogni misurazione è durata 40 minuti e i dati sono stati raccolti con una frequenza di campionamento di 1000 Hz.

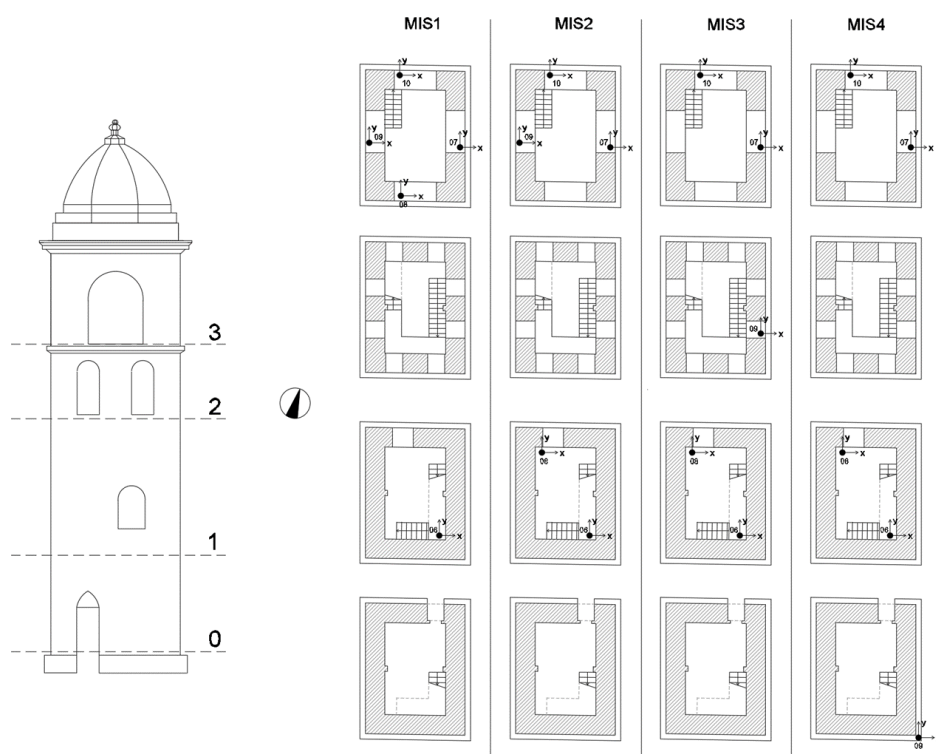


Figura 80 – Campanile di San Ciriaco - Il layout degli accelerometri per ogni setup di misura

Le time histories registrate sono state prima filtrate e decimate, per eliminare il rumore e ridurre i dati in un intervallo di frequenze comuni per le torri 0,5-16,67Hz, e poi elaborate con Cov SSI-PC (Covariance Stochastic Subspace Identification Principal Component) che ha consentito di estrarre le frequenze e le forme modali della struttura. (Figura 81; Tabella 3)

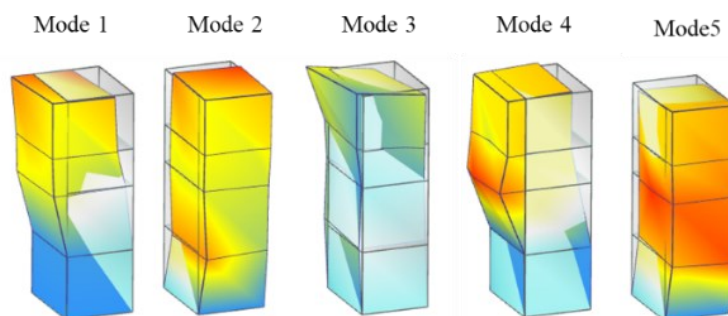


Figura 81 – Campanile di san Ciriaco – Forme modali registrate sperimentalmente

Mode	f_{exp} [Hz]	Complexity [%]	Damping [%]	Shape
1	3.26	0.94	1.32	TRAN-Y
2	4.04	0.26	1.36	TRAN-X
3	7.50	8.47	0.77	ROT-Z
4	10.00	0.23	1.60	FLEX-Y
5	12.61	0.42	1.83	FLEX-Z

Tabella 3 – Campanile di San Ciriaco – Parametri dinamici sperimentalmente ottenuti con OMA

4.3.3.3.2. Calibrazione del modello numerico

La calibrazione numerica consiste nella variazione di parametri di materiali sconosciuti, come i moduli elastici, le densità e i valori di Poisson, al fine di minimizzare le differenze tra sperimentale (e) e NM (n). L'accuratezza di questa procedura è stata verificata utilizzando la percentuale di errore di frequenza (Eq. (1)) e il Modal Assurance Criteria (MAC) (Eq. (2)) (Pastor et al., 2012). Il MAC è stato eseguito confrontando i vettori modali del NM (ψ_n) con i vettori modali registrati durante l'OMA (ψ_e), considerando tutte le posizioni i-esime dei sensori e le tre direzioni (X-Y-Z). Il MAC può assumere valori compresi tra uno e zero (i valori dei vettori modali sono normalizzati), con uno che indica la correlazione perfetta mentre 0 significa che le forme modali sono completamente diverse. Per l'Eq. (1) solo differenze inferiori al 5% sono state considerate accettabili.

$$\Delta f = \left| \frac{f_e - f_n}{f_e} \right| * 100 \tag{1}$$

Il “sistema edificio”

$$MAC(n, e) = \frac{|\sum_{j=1}^{3i} (\psi_e)_j * (\psi_n)_j|^2}{(\sum_{j=1}^{3i} (\psi_e)_j * (\psi_e)_j) * (\sum_{j=1}^{3i} (\psi_n)_j * (\psi_n)_j)} \quad (2)$$

La calibrazione numerica è stata quindi eseguita in tre fasi.

All'inizio per i materiali identificati sono stati assunti i valori presenti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) (Figura 16). Il campanile è stato vincolato alla base; il carico del castello campanario è stato assegnato come massa aggiuntiva sul solaio in calcestruzzo.

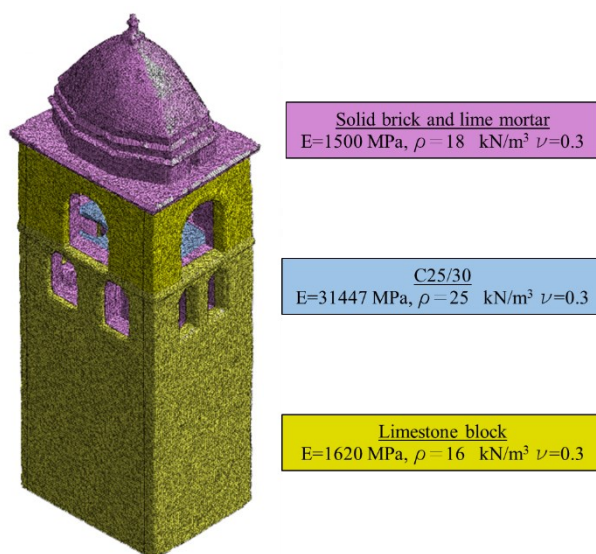


Figura 82 – Campanile di San Ciriaco – Materiali assegnati (prima prova)

Il modello è stato sottoposto ad analisi dinamica lineare per ottenere le frequenze numeriche e le forme modali. Una sostanziale differenza tra le frequenze è stata trovata confrontando i risultati con la campagna sperimentale, mentre le forme modali erano abbastanza in linea con la realtà mostrando valori di Criteri di assicurazione modale (MAC) compresi in un intervallo tra il 56% e l'88%. (Figura 17, Tabella 2)

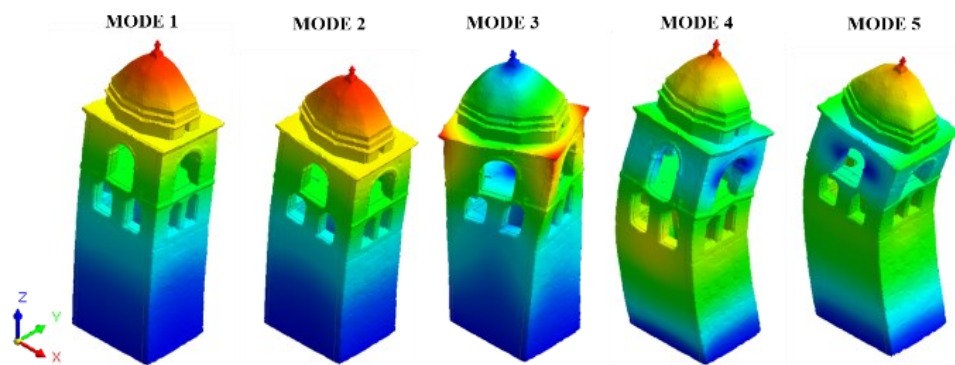


Figura 83 – Campanile di San Ciriaco - Forme modali del modello numerico di partenza

Mode	f_{exp} [Hz]	f_{num} [Hz]	Δf [%]	Shape	MAC [%]
1	3.26	2.24	33.23	TRAN-Y	83.95
2	4.04	2.79	30.94	TRAN-X	68.94
3	7.50	5.67	24.40	ROT-Z	55.50
4	10.00	7.7	23.00	FLEX-Y	82.17
5	12.61	9.89	21.00	FLEX-Z	88.43

Tabella 4 – Campanile di San Ciriaco - Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico di partenza

La struttura reale è apparsa più rigida rispetto alla NM, probabilmente a causa dell'intervento di iniezioni armate eseguito sui pannelli in muratura nel 1963. Per questo motivo il secondo passaggio è consistito nell'aumento del modulo elastico dei mattoni e della muratura in calcare, considerando un fattore moltiplicativo valutato come rapporto quadratico tra le prime frequenze sperimentali e numeriche.

Questo approccio ha permesso di adattare bene le prime due frequenze, anche se le altre erano ancora troppo distanti dai dati sperimentali.

Mode	f_{exp} [Hz]	f_{num} [Hz]	Δf [%]	Shape
1	3.26	3.24	0.60	TRAN-Y
2	4.04	4.04	0.00	TRAN-X
3	7.50	8.20	9.30	ROT-Z
4	10.00	11.56	15.60	FLEX-Y
5	12.61	14.32	13.60	FLEX-Z

Tabella 5 – Campanile di San Ciriaco - Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico aggiornato al secondo step

Il “sistema edificio”

Osservando le reali forme modali in Figura 81, si può notare che il 3°, 4° e 5° modo coinvolgono la parte superiore della torre più del resto dell'edificio, poiché è più esposta a fattori ambientali che possono aver ridotto la qualità della muratura negli anni. Per questo motivo il Modulo di Young della muratura al di sotto della cella campanaria è stato aumentato mentre quelli della cella campanaria e della cupola sono stati ridotti fino ad ottenere differenze percentuali con le frequenze dell'esperimento inferiori al 5% (Figura 84, Figura 85, Tabella 6).

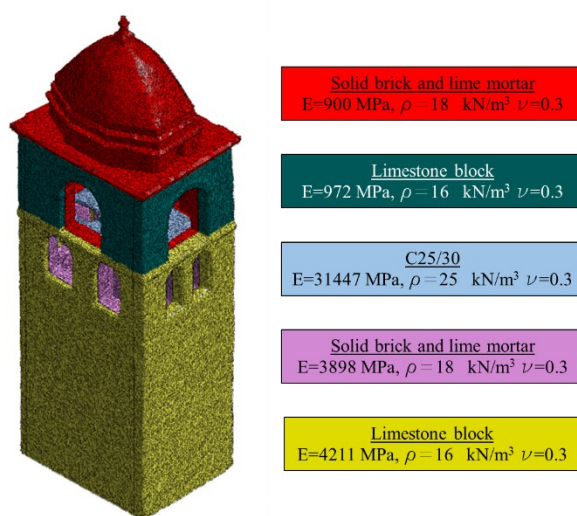


Figura 84 – Campanile di San Ciriaco – Materiali assegnati (modello finale)

Mode	f_{exp} [Hz]	f_{num} [Hz]	Δf [%]	Shape	MAC [%]
1	3.26	3.25	0.31	TRAN-Y	82.90
2	4.04	4.06	0.50	TRAN-X	82.49
3	7.50	7.38	1.35	ROT-Z	65.62
4	10.00	10.25	2.5	FLEX-Y	89.14
5	12.61	12.52	0.71	FLEX-Z	85.56

Tabella 6 – Campanile di San Ciriaco – Confronto tra dati sperimentali e numerici considerando il modello numerico aggiornato all'ultima fase

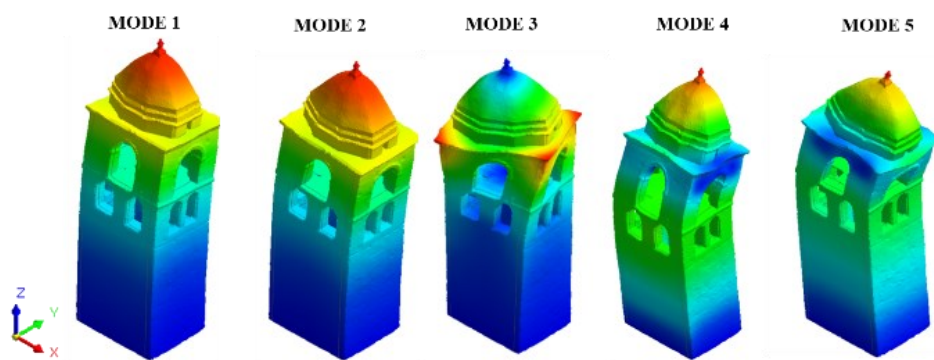


Figura 85 – Campanile di San Ciriaco - Forme numeriche modali ottenute con analisi degli autovalori effettuata sul modello aggiornato all'ultimo step

Confrontando i valori MAC dell'ultimo passaggio con il primo modello, è evidente anche un miglioramento della 2a 3a e 4a forma modale. (Figura 85, Tabella 6)

5. Conclusioni

5.1. Analisi critica delle metodologie sviluppate per il “sistema urbano” e per il “sistema edificio”

Il percorso di ricerca si è strutturato su una duplice scala mantenendo in entrambi i casi l'obiettivo comune di rendere più affidabile, facile ed evoluto il grado di integrazione, utilizzo e gestione dei dati ottenuti dal rilievo, in altri termini di avanzare le gestione dei dati di rilievo..

Tale biforcazione ha permesso di conciliare le linee di ricerca dell'azienda con approfondimenti emersi durante le fasi di sviluppo della piattaforma stessa, ma anche con linee di ricerca del gruppo universitario, sfruttando una logica interdisciplinare che ha portato alla collaborazione con strutturisti.

L'efficacia delle innovazioni ottenute è comprovata dal diretto utilizzo di molte di queste filiere studiate direttamente nell'ambiente professionale dell'azienda. Ciò testimonia l'avvenuto trasferimento tecnologico che rappresentava il fine ultimo della ricerca, nel caso contingente come spesso anche nel campo più generale della ricerca scientifica applicata.

Molteplici sono stati gli obiettivi, comuni ai diversi campi di applicazione della ricerca, che ci si era posti nelle fasi iniziali della ricerca.

Sicuramente il principale era rappresentato dalla volontà di impiegare al massimo la ricchezza del dato offerto dalla nuvola di punti.

Spesso ancora, nonostante le tecnologie e gli strumenti che consentono di ottenere questo prodotto del rilievo inizino ad essere piuttosto consolidate, la nuvola di punti viene utilizzata con logiche legate ad una idea del rilievo tradizionale. Questo approccio risulta limitante sin dal momento della progettazione della campagna di rilievo.

In questa ottica si è cercato quindi di ottimizzare le filiere esistenti e innovarle per rendere fruibile al massimo la nuvola di punti nella piattaforma, prettamente afferente ad una scala urbana, permettendone non solo la visualizzazione ma anche la manipolazione e l'uso per derivarne ulteriori analisi e quindi dati. Sull'altro fronte, quello dell'edificio si è invece puntato a rendere la nuvola di punti l'oggetto diretto dell'analisi strutturale.

Un altro aspetto importante che si è tenuto in considerazione è il fattore tempo. Per poter rendere una metodologia performante, ancor di più in un'ottica aziendale, la capacità di minimizzare i tempi di elaborazione risulta determinante.

Nei paragrafi successivi saranno esposti nel dettaglio gli avanzamenti ottenuti in ciascun ambito.

5.1.1. Il “Sistema urbano”

Alla scala urbana la piattaforma, così come strutturata in origine, permetteva di avere una visione interconnessa di dati di diversa origine. Era già possibile, infatti, visionare e consultare dati di diversa tipologia e provenienti da differenti discipline organizzati e catalogati secondo una logica spaziale. La base cartografica permetteva, e permette tutt'ora, di avere una visione d'insieme da cui è possibile accedere al dato di dettaglio.

Il primo contributo offerto nell'ottica della valorizzazione della rappresentazione e del rilievo dell'architettura storica è stata l'implementazione dello strumento di visualizzazione delle nuvole di punti all'interno della piattaforma.

Questo strumento, con tutte le sue annesse funzionalità (vedi paragrafo 3.3.1.1), vuole ambire ad un risultato più alto di quello che può apparire nell'immediatezza: rendere la nuvola di punti l'oggetto finale del rilievo stesso e non uno strumento intermedio da cui dedurre, come unica possibilità di consultazione e lettura, elaborati di disegno tradizionali bidimensionali.

Permettere l'accesso e la consultazione diretta della nuvola di punti permette infatti di indagare infinite possibilità di “discretizzazione” dell'oggetto rilevato. La combinazione tra struttura della piattaforma, basata su layout web based, e gli strumenti implementati consente di superare uno dei limiti più grandi all'uso della nuvola di punti: l'enorme dimensione fisica del dato originale (che può arrivare a svariati terabyte) renderebbe impossibile anche solamente la visualizzazione di nuvole di punti rappresentanti porzioni di città.

È facile comprendere come mettere a disposizione una quantità di informazioni tale attraverso i tradizionali elaborati bidimensionali risulti proibitivo.

Lo strumento della piattaforma così strutturato lascia libertà all'utente e all'esperto professionista di scegliere su quali informazioni concentrarsi, rendendolo indipendente da qualsiasi software proprietario oltretutto dal requisito di importanti strumentazioni hardware che questi ultimi richiedono.

La piattaforma è pensata per un utilizzo da parte di un ampio pubblico di utenti con una formazione anche diversa da quella degli esperti del disegno architettonico e la volontà di rendere facilmente accessibile e centralizzare la nuvola di punti nasce da questo presupposto. Questo non mette in discussione la necessità di figure specializzate e colte, che hanno comunque il compito e la responsabilità dell'interpretazione del rilievo, come necessaria

Conclusioni

traduzione del dato di rilievo in elaborato di disegno. Si tratta invece di fornire degli strumenti in grado di facilitare il loro lavoro, rendendo quindi sostenibile una intera filiera.

Proprio per questo motivo si è deciso di introdurre e implementare l'altro strumento (vedi paragrafo 3.3.2) che consente l'estrazione e l'esportazione di dati per consentirne la loro rielaborazione, attraverso la conoscenza e l'esperienza propria del tecnico e dell'esperto rilevatore.

La possibilità di realizzare anche il percorso inverso, ovvero caricare sulla piattaforma il dato estratto e rielaborato, chiude il processo di arricchimento del dato, mantenendo la centralità della nuvola di punti.

5.1.1. Il “Sistema edificio”

Per quanto riguarda la scala dell'edificio l'obiettivo di sfruttare a pieno la nuvola di punti ai fini dell'analisi strutturale si è rivelato da subito stimolante.

La metodologia affinata è stato il risultato di diversi tentativi che hanno permesso la sperimentazione e la valutazione di molteplici strumenti e dettagli del processo stesso.

In definitiva i risultati maggiormente premianti e soddisfacenti si sono ottenuti sul Campanile di San Ciriaco, nel suo secondo approccio (vedi paragrafo 4.3.3).

L'evoluzione e l'ottimizzazione del metodo ha ottenuto un duplice obiettivo: il miglioramento del processo di trasformazione della nuvola di punti in solido (Figura 86) e conseguentemente un miglioramento dell'analisi ad elementi finiti che ne è derivata.



Figura 86 – Campanile di San Ciriaco. Workflow ottimizzato

La Retopology, come più volte sottolineato, è stato il punto di svolta per ottenere un flusso di lavoro affidabile e accurato, in quanto consente di ottenere un Livello di Dettaglio (LOD) molto elevato senza i difetti e gli eventuali problemi di interoperabilità.

L'istogramma della mappa di deviazione tra la nuvola di punti e il FEM utilizzato per le analisi (generato dalla stessa nuvola di punti) mostra una valutazione quantitativa dell'accuratezza (Figura 87).

Conclusioni

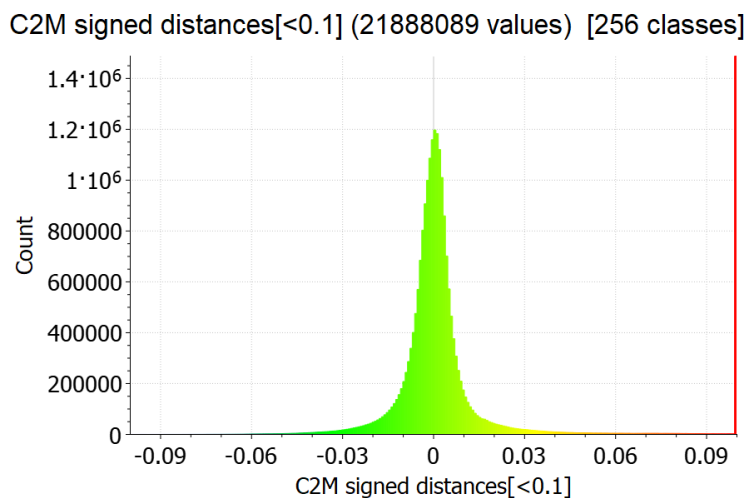


Figura 87 – Campanile di San Ciriaco - Istogramma di deviazione nuvola di punti - modello solido espresso in metri

Le mappe di deviazione mostrano graficamente la distanza tra i punti della nuvola e il modello solido da essa generato (Figura 88). Solo una parte marginale dei punti, in corrispondenza degli spigoli più acuti, si discosta di un ordine di oltre dieci millimetri dal modello finale.

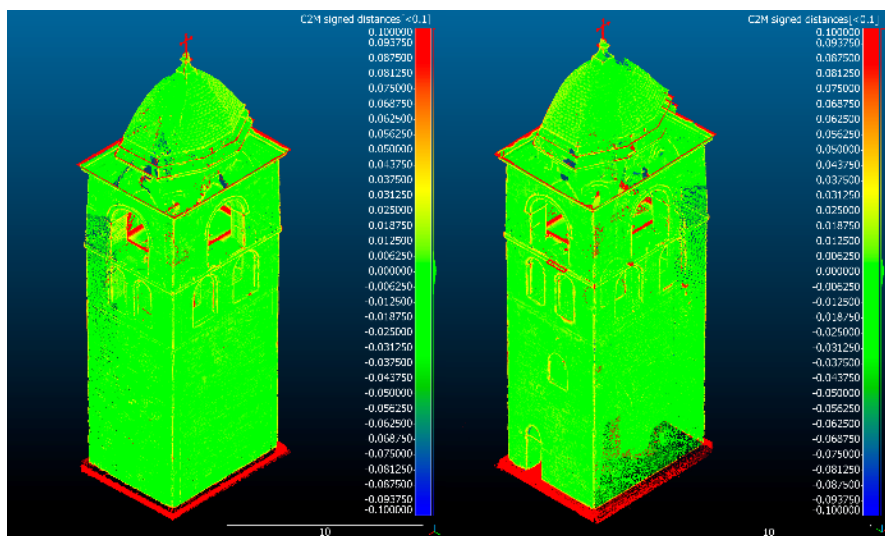


Figura 88 – Campanile di San Ciriaco – Mappa di deviazione nuvola di punti - modello solido espresso in metri

Altro aspetto molto significativo di questo processo ottimizzato è senza dubbio la possibilità di rispettare fedelmente la semantica della struttura, portando alla discretizzazione del modello in parti differenti a seconda del materiale che lo costituisce.

Infine, osservando i risultati OMA, la torre analizzata presenta le classiche forme modali delle torri isolate, in quanto le prime due sono traslazionali mentre la terza è rotazionale. Per quanto riguarda l'analisi quantitativa delle frequenze, inoltre, si è ottenuto un modello che avvicina i valori delle misure sperimentali OMA (con un errore al di sotto del 5%) per tutte e cinque le frequenze delle prime cinque forme modali, ottenendo quindi il grado di miglioramento che ci si era posti nell'approccio del primo caso studio (vedi paragrafo 4.3.1.4)

Da quanto sopra descritto si può dire di essere giunti ad una metodologia affidabile e ripetibile che minimizza i tempi di lavorazione dell'utente e al contempo minimizza anche il grado di discrezionalità che lo stesso utente può introdurre nel corso del processo.

Il risultato è quindi una prassi completa, veloce e quanto più obiettiva.

5.2. Sviluppi futuri e integrazione dei due sistemi

In ottica futura molteplici sono i miglioramenti e i progressi che possono essere perseguiti sulla base dei temi affrontati in questa ricerca.

La piattaforma di gestione dei dati presentata risulta una buona base con utili strumenti, che ha davanti a sé ampi margini di avanzamento. La sua struttura a mo' di contenitore è la caratteristica che la rende particolarmente adattabile e implementabile: è infatti possibile integrare, praticamente senza limiti, sia tipologie di dati differenti da quelli già presenti (provenienti da qualsivoglia ambito/fonte o sistema di acquisizione), sia ulteriori strumenti.

Un campo di grande interesse è quello del monitoraggio, particolarmente stimolante ed utile tanto nel campo infrastrutturale quanto in quello del patrimonio storico architettonico.

L'analisi e la valutazione approfondita e puntuale dal punto di vista della manutenzione e dell'efficienza strutturale è di fondamentale e imprescindibile importanza nella valutazione della sicurezza degli edifici storici e su questo tema si è ampiamente spesa la presente tesi. Ma altrettanta importanza riveste il ruolo del monitoraggio.

La valutazione in tempo reale con strumenti speditivi, che possono spaziare da tecniche a basso costo come l'ipotesi avanzata al paragrafo 3.3.1.2, sino a strumentazioni più costose come le registrazioni tramite accelerometri o a tecniche contact-less come l'interferometria, assume un ruolo decisivo nella salvaguardia del bene stesso e degli utenti che ne usufruiscono.

La possibile integrazione dei dati di monitoraggio all'interno della piattaforma rappresenterebbe un indiscutibile vantaggio nella gestione integrata delle strutture e delle infrastrutture, consentendone inoltre la visualizzazione in tempo reale da remoto. Tale approccio è stato già sperimentato dall'azienda in ambito urbano con l'intento di monitorare il livello di rumorosità di alcuni quartieri e la qualità dell'aria degli stessi.

Per quanto riguarda la metodologia sviluppata per l'utilizzo semi-diretto della nuvola di punti ai fini dell'analisi strutturale ad elementi finiti, come detto, si è raggiunto un buon risultato concretizzando le premesse avanzate da studi precedenti.

Ci sono sicuramente margini di miglioramento e a tal fine è necessario testare la metodologia finale su altri casi studio per validare ulteriormente il workflow definito.

Successivamente la validazione del metodo dovrà estendersi ad altre tipologie edilizie del patrimonio storico. Nei casi studio sono stati presi in esame esclusivamente edifici della tipologia a torre in muratura. Lo studio si potrà quindi estendere a tipologia di tipo residenziale o comunque civile ma che abbia uno sviluppo in pianta superiore a quello in

altezza (contrariamente a quanto avviene con le torri). La tipologia costruttiva delle strutture per cui è applicabile questo metodo, di contro, dovrà rimanere nell'ambito della muratura, poiché negli edifici con una struttura a telaio il rilievo tramite TLS (o più in generale tramite tecniche che hanno come risultato la nuvola di punti) genera una nuvola di punti in cui la struttura non è individuabile direttamente. In questi casi la generazione del modello ad elementi finiti, pur partendo dalla nuvola di punti, sarà necessariamente il prodotto di una ricostruzione manuale da parte dell'utente che dovrà discretizzare le componenti strutturali dell'edificio da quelle non strutturali.

Altro ambito di applicazione della metodologia potrà essere nel campo delle infrastrutture storiche come ponti in muratura o in pietra di cui è ricco il nostro territorio.

Ad ogni modo l'obiettivo finale dovrà essere quello dell'integrazione tra i due ambiti come anticipato nel caso del monitoraggio: la piattaforma ha infatti le potenzialità e le caratteristiche per essere il collettore di tutte queste informazioni.

Si dovrà quindi perseguire l'obiettivo di integrare i modelli ad elementi finiti, ottenuti dall'applicazione della metodologia proposta, all'interno della piattaforma garantendo la duplice possibilità di upload e download degli stessi.

Infine un ulteriore tema di sviluppo riguarderà la possibilità di gestire e visualizzare all'interno della piattaforma modelli informati in formato di interscambio *.ifc.

Così facendo la piattaforma riuscirebbe a contenere al suo interno anche tutte le istanze e gli avanzamenti ottenuti nel campo dell'HBIM, divenendo un potente strumento in grado di gestire il patrimonio storico architettonico, in forma digitale e a trecentosessanta gradi.

6. Bibliografia

- Acierno, M., Cursi, S., Simeone, D., Fiorani, D., 2017. Architectural heritage knowledge modelling: an ontology-based framework for conservation process. *J. Cult. Herit.*, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.010>
- Amoruso, G., Bartolomei, C., 2010. Colore ed identità nel recupero dei centri storici., in: Atti Della 6a Conferenza Del Colore.
- Angheluta, L., 2019. *Practical guide and applications of photogrammetry in cultural heritage 3D digitization*.
- Angheluta, L., 2018. Advantages of photogrammetry as a competitive technology for cultural heritage 3D documentation., in: Joint International Student Conference on Photonics and Modern Laser. Alba Iulia, Romania.
- Apollonio, F.I., Gaiani, M., Sun, Z., 2016. A Reality Integrated BIM for Architectural Heritage Conservation. *Handb. Res. Emerg. Technol. Archit. Archaeol. Herit.*, pp. 31.
- Apollonio, F.I., Rizzo, F., Bertacchi, S., Dall’Osso, G., Corbelli, A., Grana, C., 2017. SACHER: Smart Architecture for Cultural Heritage in Emilia Romagna., in: Communications in Computer and Information Science. pp. 142–156. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68130-6_12
- Armesto-González, J., Riveiro-Rodríguez, B., González-Aguilera, D., Rivas-Brea, M.T., 2010. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *J. Archaeol. Sci.*, Vol. 37, pp. 3037–3047.
- Atteni, M., Bartolomei, C., Inglese, C., Ippolito, A., Morganti, C., Predari, G., 2018. Low cost survey and heritage value. *SCIRES-IT - Sci. Res. Inf. Technol.*, <https://doi.org/10.2423/I22394303V7N2P115>
- Atzeni, C., Bicci, A., Dei, D., Fratini, M., Pieraccini, M., 2010. Remote survey of the leaning tower of pisa by interferometric sensing. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2030903>
- Bagnéris, M., Cherblanc, F., Bromblet, P., Gattet, E., Gügi, L., Nony, N., Mercurio, V., Pamart, A., 2017. A complete methodology for the mechanical diagnosis of statue provided by innovative uses of 3D model. Application to the imperial marble statue of Alba-la-Romaine (France). *J. Cult. Herit.*, Vol. 28, pp. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.002>
- Balageas, D., Fritzen, C.P., Güemes, A., 2010. *Structural Health Monitoring*, Structural Health Monitoring. <https://doi.org/10.1002/9780470612071>
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., Schiantarelli, G., 2015. Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 57, pp. 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- Barsanti, S.G., Guidi, G., 2018. A New Methodology for the Structural Analysis of 3D Digitized Cultural Heritage through FEA. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 364.

- <https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012005>
- Bassier, M., Hadjidemetriou, G., Vergauwen, M., Van Roy, N., Verstrynge, E., 2016. Implementation of Scan-to-BIM and FEM for the Documentation and Analysis of Heritage Timber Roof Structures., in: Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). pp. 79–90. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_7
- Battini, C., 2015. The survey as a tool for analysis of the development project. The case study of Pieve a Socana. *DISEGNARECON*, Vol. 8, pp. 1–8.
- Battini, C., 2013. New systems for the management of data. the case study of the chapter house of Santa Maria Novella in Florence. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XL-5/W1. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-21-2013>
- Battini, C., 2012. *Rilievo digitale e restituzione. Concetti base ed esempi*. Alinea.
- Battini, C., Carmosino, I., Acquino, V., 2013. Urban Archaeology and representation of data The case study of convent of Sant’Orsola, Florence., in: Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie (Ed.), . Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie, Vienna.
- Battini, C., Landi, G., 2015. *3D Tracking based augmented reality for cultural heritage data management*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-375-2015>
- Battini, C., Sorge, E., 2016. Dynamic Management of Survey data and Archaeological Excavation. The case study of the Amphitheatre of Volterra. *SCIRES-IT - Sci. Res. Inf. Technol.*, Vol. 6, pp. 119–132. <https://doi.org/10.2423/I22394303V6N2P119>
- Battini, C., Vecchiattini, R., 2018. Data parametric representation for monitoring of cultural heritage. *Appl. Geomatics*, Vol. 10. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0219-1>
- Bernat, M., Janowski, A., Rzepa, S., Sobieraj, A., Szulwic, J., 2014. Studies on the use of terrestrial laser scanning in the maintenance of buildings belonging to the cultural heritage. *14th Geoconference Informatics, Geoinformatics Remote Sensing, SGEM. ORG, Albena, Bulg.*, Vol. 3, pp. 307–318.
- Bertacchi, S., Al Jawarneh, I.M., Apollonio, F.I., Bertacchi, G., Cancilla, M., Foschini, L., Grana, C., Martuscelli, G., Montanari, R., 2018. SACHER Project: A Cloud Platform and Integrated Services for Cultural Heritage and for Restoration., in: Proceedings of the 4th EAI International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good. pp. 283–288.
- Bianchini, C., Ippolito, A., Bartolomei, C., 2015. The surveying and representation process applied to architecture: Non-contact methods for the documentation of cultural heritage., in: Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation. pp. 44–93. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8379-2.ch002>
- Bitelli, G., Castellazzi, G., D’altri, A.M., De Miranda, S., Lambertini, A., Selvaggi, I., 2016. Automated voxel model from point clouds for structural analysis of cultural heritage., in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI->

Bibliografia

B5-191-2016

- Bocheńska, A., Markiewicz, J., Łapiński, S., 2019. The combination of the image and range-based 3D acquisition in archaeological and architectural research in the royal castle in Warsaw. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*,
- Bongiovanni, G., Brunetti, A., Clemente, P., Conti, C., Mazzanti, P., Verrubbi, V., 2015. Dynamic characterization of tower structures by means of interferometry measurements., in: SHMII 2015 - 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure.
- Boscatto, G., Dal Cin, A., Russo, S., Sciarretta, F., 2013. SHM of Historic Damaged Churches. *Adv. Mater. Res.*, Vol. 838–841, pp. 2071–2078. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.838-841.2071>
- Böttger, H.M., Arce Bazán, C.J., Saarman, N.P., 2016. 3D LASER SCANNING FOR PRESERVATION AND STRUCTURAL MONITORING OF HISTORIC CALIFORNIA ADOBE MISSIONS. *J. Green Build.*, Vol. 11, pp. 1–14. <https://doi.org/10.3992/jgb.11.4.1.1>
- Boulanger, C., Ouimet, C., Kretz, S., Gregg, J., 2019. Widening audiences – making heritage recording data easily accessible via html applications. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XLII-2/W15, pp. 209–213. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-209-2019>
- Bronzino, G.P.C., Grasso, N., Matrone, F., Osello, A., Piras, M., 2019. Laser-visual-inertial odometry based solution for 3D heritage modeling: the sanctuary of the Blessed Virgin of Trompone. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*,
- Brunetti, A., Mazzanti, P., 2015. Monitoring an unstable road embankment for public safety purposes by Terrestrial SAR Interferometry. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1508_56_brunetti
- Bryan, P., Blake, B., Bedford, J., 2013. *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, 3rd ed. English Heritage.
- Caroti, G., Franconi, A., Piemonte, A., 2012. Metodologia di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale. *Atti 16a Conf. Naz. ASITA 2012*, pp. 383–390.
- Carpiceci, M., 2012. *Fotografia digitale e architettura. Storia strumenti ed elaborazioni con le odierne attrezzature fotografiche e informatiche*, I. ed. Aracne Editrice, Roma.
- Castagnetti, C., Mancini, F., Rivola, R., Rossi, P., Oppici, S., Albano, V., Formentini, M., 2016. Potenzialità dei nuovi sistemi indossabili per la scansione 3D-Una sperimentazione del Pegasus Backpack di LeicaGeosystems presso il Palazzo Ducale di Modena. *Archeomatica*, Vol. 7.
- Castellazzi, G., Altri, A.M.D., Miranda, S. De, Ubertini, F., 2017. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Eng. Struct.*, Vol. 132, pp. 229–248. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.032>
- Castellazzi, G., D’Altri, A., Bitelli, G., Selvaggi, I., Lambertini, A., 2015. From Laser

- Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. *Sensors*, Vol. 15, pp. 18360–18380. <https://doi.org/10.3390/s150818360>
- Chiarini, S., Cremonesi, S., Fregonese, L., Fassi, F., Taffurelli, L., 2014. A multi-range approach for Cultural Heritage survey: a case study in Mantua Unesco site. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XL-5, pp. 157–164. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-157-2014>
- Clementi, F., Milani, G., Ferrante, A., Valente, M., Lenci, S., 2019. Crumbling of Amatrice clock tower during 2016 Central Italy seismic sequence: Advanced numerical insights. *Frat. ed Integrità Strutt.*, Vol. 14, pp. 313–335. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.24>
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., Ruggeri, L., 2016a. SFM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, Vol. 41, pp. 229–236. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-229-2016>
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., Sagone, L., 2014. Colore, riflettanza e temperatura. Dal caso studio di Villa Trissino a nuove applicazioni integrate di dati lidar terrestri per il rilievo e la diagnostica. *Cult. E Sci. DEL Color. / Color Cult. Sci.*, Vol. 2 2014, pp. 27–33.
- Clini, P., Ruggeri, L., Plescia, G., 2016b. Il Disegno dell'architettura antica. Nuovi codici per la comprensione e la fruizione. Tecniche di SFM per il rilievo de “La Pianta di Mausoleo con Giardino”, collocata al Lapidarium del Palazzo Ducale di Urbino., in: *Le Ragioni Del Disegno*. Gangemi Editore, Firenze, pp. 217–224. <https://doi.org/ISBN978-88-492-3295-0>
- Costantino, C., Prati, D., Predari, G., Bartolomei, C., 2020. 3D Laser scanning survey for cultural heritage. A Flexible methodology to optimize data collection., in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-821-2020>
- De Luca, L., 2009. *La photomodélisation architecturale: relevé, modélisation et représentation d'édifices à partir de photographies*. Eyrolles.
- De Stefano, A., Matta, E., Clemente, P., 2016. Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0154-y>
- Di Giulio, R., Boeri, A., Longo, D., Gianfrate, V., Boulanger, S.O.M., Mariotti, C., 2019. ICTs for Accessing, Understanding and Safeguarding Cultural Heritage: The Experience of INCEPTION and ROCK H2020 Projects. *Int. J. Archit. Herit.*, pp. 1–19.
- Doebling, S.W.S., Farrar, C.R.C., Prime, M.B.M., Shevitz, D.W.D., 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Los Alamos Natl. Lab.*, <https://doi.org/10.2172/249299>

Bibliografia

- Dore, C., Murphy, M., McCarthy, S., Brechin, F., Casidy, C., Dirix, E., 2015. Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, Vol. 40, pp. 351–357. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>
- e-cassini, n.d. e-cassini Navigator [WWW Document]. URL <https://www.e-cassini.fr/en/database-en/> (accessed 1.30.21).
- El-Sheimy, N., Lari, Z., 2020. GNSS Applications in Surveying and Mobile Mapping. *Position, Navig. Timing Technol. 21st Century Integr. Satell. Navig. Sens. Syst. Civ. Appl.*, pp. 1711–1733.
- Evgenikou, V., Georgopoulos, A., 2015. Investigating 3D reconstruction methods for small artifacts. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, Vol. 40, pp. 101–108. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-101-2015>
- Fassi, F., Perfetti, L., 2019. Backpack mobile mapping solution for dtm extraction of large inaccessible spaces. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XLII-2/W15, pp. 473–480. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-473-2019>
- Federman, A., Shrestha, S., Quintero, M.S., Mezzino, D., Gregg, J., Kretz, S., Ouimet, C., 2018. Unmanned aerial vehicles (uav) photogrammetry in the conservation of historic places: Carleton immersive media studio case studies. *Drones*, Vol. 2, pp. 18.
- Forkuo, E.K., King, B., 2004. Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 35, pp. 921–926.
- Fortunato, G., Funari, M.F., Lonetti, P., 2017. Survey and seismic vulnerability assessment of the Baptistery of San Giovanni in Tumba (Italy). *J. Cult. Herit.*, Vol. 26, pp. 64–78. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.010>
- Galantucci, R.A., Fatiguso, F., Galantucci, L.M., 2018. A proposal for a new standard quantification of damages of cultural heritages, based on 3D scanning. *SCIRES-IT*, Vol. 8, pp. 121–138. <https://doi.org/10.2423/i22394303v8n1p121>
- Gambardella, C., Pisacane, N., Argenzano, P., Avella, A., 2016. Il disegno del paesaggio urbano. Il rilievo digitale integrato attraverso piattaforma ‘mobile mapping’ della via Consolare Appia tra Capua e Maddaloni., in: Ermes Edizioni Scientifiche (Ed.), *Processi Di Analisi per Strategie Di Valorizzazione Dei Paesaggi Urbani. I Luoghi Storici Tra Conservazione e Innovazione*. pp. 63–70.
- Gentile, C., Bernardini, G., 2010. An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: Laboratory and full-scale tests. *Struct. Infrastruct. Eng.*, <https://doi.org/10.1080/15732470903068557>
- Gentile, C., Ruccolo, A., Canali, F., 2019. Long-term monitoring for the condition-based structural maintenance of the Milan Cathedral. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 228, pp. 117101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117101>
- Gentile, C., Saisi, A., 2007. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Constr. Build. Mater.*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007>

- Giaccone, D., Fanelli, P., Santamaria, U., 2020. Influence of the geometric model on the structural analysis of architectural heritage. *J. Cult. Herit.*, Vol. 43, pp. 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.001>
- Godinho, M., Machete, R., Ponte, M., Falcão, A.P., Gonçalves, A.B., Bento, R., 2020. BIM as a resource in heritage management: An application for the National Palace of Sintra, Portugal. *J. Cult. Herit.*, Vol. 43, pp. 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.010>
- Grilli, E., Remondino, F., 2020. Machine Learning Generalisation across Different 3D Architectural Heritage. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, Vol. 9, pp. 379.
- Guarnieri, A., Remondino, F., Vettore, A., 2006. Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. 36, pp. 1–6.
- Ippolito, A., Bartolomei, C., Capiato, E., 2013. Photography as a cataloguing tool: documentation for cataloguing by means of image matching. *DISEGNARECON*, Vol. 6. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/3853>
- Jo, Y.H., Hong, S., 2019. Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, Vol. 8, pp. 53.
- Kersten, T., Lindstaedt, M., Maziull, L., Schreyer, K., Tschirschwitz, F., Holm, K., 2015. 3D recording, modelling and visualisation of the fortification kristiansten in Trondheim (Norway) by photogrammetric methods and terrestrial laser scanning in the framework of Erasmus programmes. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. 40, pp. 255.
- Kingsland, K., 2020. Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, Vol. 18, pp. e00157.
- Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., Korumaz, A.G., Fiorini, L., 2017. An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Eng. Struct.*, Vol. 153, pp. 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.026>
- Laefer, D.F., Truong-Hong, L., 2017. Toward automatic generation of 3D steel structures for building information modelling. *Autom. Constr.*, Vol. 74, pp. 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.011>
- Leica Hexagon, n.d. HxDR - Digital Reality [WWW Document]. *Leica Hexag.*, URL <https://hxd.com/> (accessed 1.30.21).
- Llamas, J., Lerones, P.M., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., 2016. Applying deep learning techniques to cultural heritage images within the INCEPTION project., in: *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48974-2_4
- Manajitprasert, S., Tripathi, N.K., Arunplod, S., 2019. Three-dimensional (3D) modeling of

Bibliografia

- cultural heritage site using UAV imagery: A case study of the pagodas in Wat Maha That, Thailand. *Appl. Sci.*, Vol. 9, pp. 3640.
- Markova, M., Kravchenko, D., 2018. 3D photogrammetry application for building inspection of cultural heritage objects. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.*
- Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., Pirotti, F., Visintini, D., Vettore, A., 2018. Performance evaluation of two indoor mapping systems: Low-cost UWB-aided photogrammetry and backpack laser scanning. *Appl. Sci.*, Vol. 8, pp. 416.
- Mazzanti, P., Brunetti, A., Buffarini, E.G., Bongiovanni, E.G., 2014. Integrating Contact and Remote Sensing Techniques For Quick Recognition Of Bridge Dynamic Behaviour. *ISHMII Monit.*, Vol. 9, pp. 17–19.
- McCarthy, J., 2014. Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *J. Archaeol. Sci.*, Vol. 43, pp. 175–185.
- Mingucci, R., Garagnani, S., Manferdini, A.M., Bartolomei, C., Cipriani, L., 2012. Integrated modeling for the restoration project management. *DISEGNARECON*, Vol. 5, pp. 103–106. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/3457>
- Mohamed, M.A., Shaker, I.F., Ragab, A.F., Mogahed, Y.M., 2019. Accuracy assessment of terrestrial laser scanner in heritage documentation. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, Vol. 8, pp. 117–123.
- Morbidoni, C., Pierdicca, R., Paolanti, M., Quattrini, R., Mammoli, R., 2020. Learning from synthetic point cloud data for historical buildings semantic segmentation. *J. Comput. Cult. Herit.*, <https://doi.org/10.1145/3409262>
- Morganti, C., Bartolomei, C., 2018. Digital Survey and Documentation of La Habana Vieja in Cuba., in: *Advances in Digital Cultural Heritage*. Springer, pp. 15–31.
- NavVis, n.d. NavVis IndoorViewer [WWW Document]. *NavVis.* URL <https://www.navvis.com/indoorviewer> (accessed 1.30.21).
- Nespeca, R., 2019. Towards a 3D digital model for management and fruition of Ducal Palace at Urbino. An integrated survey with mobile mapping. *SCIRES-IT-SCientific Res. Inf. Technol.*, Vol. 8, pp. 1–14.
- Nespeca, R., De Luca, L., 2016. Analysis, thematic maps and data mining from point cloud to ontology for software development. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XLI-B5, pp. 347–354. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-347-2016>
- Nespeca, R., Quattrini, R., Mancini, A., 2017. Rilievo fotogrammetrico e visualizzazione in autostereoscopia di piccole sculture. La Venere di Frasassi come pilot-case per i Musei Archeologici., in: *Empler, T. (Ed.), 3D MODELING & BIM Progettazione, Design, Proposte per La Ricostruzione*. DEI Tipografia del Genio Civile, pp. 466–480.
- Pamart, A., Ponchio, F., Abergel, V., Alaoui M'Darhri, A., Corsini, M., Dellepiane, M., Morlet, F., Scopigno, R., De Luca, L., 2019. A COMPLETE FRAMEWORK OPERATING SPATIALLY-ORIENTED RTI in A 3D/2D CULTURAL HERITAGE

- DOCUMENTATION and ANALYSIS TOOL., in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-573-2019>
- Paris, L., 2012. Fotogrammetria e/o fotomodellazione., in: Geometria Descrittiva e Rappresentazione Digitale. Memoria e Innovazione. Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione, pp. 55–62.
- Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T., 2012. Modal assurance criterion. *Procedia Eng.*, Vol. 48, pp. 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- Pesci, A., Casula, G., Boschi, E., 2011. Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): Detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings. *J. Cult. Herit.*, Vol. 12, pp. 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.01.002>
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., Boschi, E., 2013. A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 79, pp. 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021>
- Pieraccini, M., Fratini, M., Parrini, F., Atzeni, C., Bartoli, G., 2008. Interferometric radar vs. accelerometer for dynamic monitoring of large structures: An experimental comparison. *NDT E Int.*, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.11.002>
- Pritchard, D., Sperner, J., Hoepner, S., Tenschert, R., 2017. Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. 4.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Arias, P., 2013. Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, Vol. 46, pp. 2127–2145.
- Quagliarini, E., Clini, P., Ripanti, M., 2017. Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: The case study of Santa Maria in Portonovo (Italy). *J. Cult. Herit.*, Vol. 24, pp. 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.10.006>
- Quattrini, R., Malinverni, E.S., Clini, P., Nespeca, R., Orlietti, E., 2015. From tls to hbim. high quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, Vol. 40, pp. 367–374. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015>
- Quattrini, R., Pierdicca, R., Morbidoni, C., 2017. Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web. *J. Cult. Herit.*, Vol. 28, pp. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>
- Rami, A.-R., 2012. Photogrammetry for archaeological documentation and cultural heritage conservation. *Spec. Appl. Photogramm.*, pp. 97.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T.P., Troisi, S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—A critical overview., in: Euro-Mediterranean Conference. Springer, pp. 40–54.
- Remondino, F., Menna, F., 2008. Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. XXXVII, pp.

Bibliografia

- 199–206.
- Ribilotta, E., Clementi, F., Pellegrino, M., Poiani, M., Gazzani, V., Santilli, G., Lenci, S., 2018. Monitoring cultural heritage buildings: The San Ciriaco bell-tower in Ancona., in: 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF COMPUTATIONAL METHODS IN SCIENCES AND ENGINEERING. Thessaloniki, Greece, p. 090005. <https://doi.org/10.1063/1.5079151>
- Rinaudo, F., Eros, A., Ardissonne, P., 2007. Gis and Web-Gis, Commercial and Open Source Platforms: General Rules for Cultural Heritage Documentation., in: XXI International CIPA Symposium. Athens.
- Schonberger, J.L., Frahm, J.-M., 2016. Structure-from-Motion Revisited., in: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, pp. 4104–4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Schütz, M., 2016. Potree: Rendering large point clouds in web browsers. *Tech. Univ. Wien, Wien*.
- Schütz, M., Ohrhallinger, S., Wimmer, M., 2020. Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds., in: Computer Graphics Forum. Wiley Online Library, pp. 155–167.
- Seker, D.Z., Alkan, M., Kutoglu, H., Akcin, H., Kahya, Y., 2010. Development of a GIS based information and management system for cultural heritage site; Case study of Safranbolu., in: FIG Congress.
- Sicuranza, F., 2013. Sperimentazione di sistemi di structure from motion per la restituzione di apparati decorativi. Doctoral dissertation, La Sapienza Università di Roma.
- Siebke, I., Campana, L., Ramstein, M., Furtwängler, A., Hafner, A., Lösch, S., 2018. The application of different 3D-scan-systems and photogrammetry at an excavation — A Neolithic dolmen from Switzerland. *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, Vol. 10. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00078>
- Spangher, A., Visintini, D., 2015. Il livello di dettaglio dei modelli 3D geomatici per l'analisi strutturale FEM. *Atti 19a Conf. Naz. ASITA 2015*, pp. 755–762.
- Standoli, G., Giordano, E., Milani, G., Clementi, F., 2020. Model Updating of Historical Belfries Based on OMA Identification Techniques. *Int. J. Archit. Herit.*, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1723735>
- Tognaccini, R., 2009. La Chiesa di Santa Maria del Mar a Barcellona – Dal Rilievo Tridimensionale all'Analisi Strutturale. University of Pisa.
- Trimble, n.d. Trimble Clarity [WWW Document]. *Trimble*., URL <https://clarity.trimble.com/> (accessed 1.30.21).
- Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Laura Pisello, A., Luigi Materazzi, A., Cotana, F., 2017. Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment. *Mech. Syst. Signal Process.*, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.025>
- Università di Bologna, 2020. eBIM existing building information modeling [WWW

- Document]. *Università di Bol.*, URL https://www.progetto-ebim.it/_new/ (accessed 1.30.21).
- Valente, M., Milani, G., 2016. Seismic assessment of historical masonry towers by means of simplified approaches and standard FEM. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 108, pp. 74–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.025>
- Venanzi, I., Kita, A., Cavalagli, N., Ierimonti, L., Ubertini, F., 2020. Earthquake-induced damage localization in an historic masonry tower through long-term dynamic monitoring and FE model calibration. *Bull. Earthq. Eng.*, Vol. 18, pp. 2247–2274. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00780-4>
- Venanzi, I., Kita, A., Cavalagli, N., Ierimonti, L., Ubertini, F., 2019. Continuous OMA for Damage Detection and Localization in the Sciri tower in Perugia, Italy., in: IOMAC – International Operational Modal Analysis Conference 2019At: Copenhagen, Denmark. Copenhagen, Denmark.
- Visintini, D., Spangher, A., 2014. Il contributo della Geomatica per l’analisi strutturale dei beni culturali: l’esempio di una statua romana lesionata., in: 18a Conferenza Nazionale ASITA. Firenze, pp. 1229–1236.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yastikli, N., 2007. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *J. Cult. Herit.*, Vol. 8, pp. 423–427. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2007.06.003>
- Ye, X., Li, J., Huang, H., Du, L., Zhang, X., 2018. 3D Recurrent Neural Networks with Context Fusion for Point Cloud Semantic Segmentation., in: Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). pp. 415–430. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_25