

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Architettura

Corso di Laurea Magistrale

in

**Architettura per il Restauro e Valorizzazione del
Patrimonio**

Tesi di Laurea Magistrale



**IL RUOLO DELLA GEOMATICA PER SUPPORTARE LE
SITUAZIONI DI EMERGENZA POST EVENTI SISMICI
DEI BENI ARCHITETTONICI.**

ANALISI MULTI-TEMPORALE DELLA CHIESA DI SANT'AGOSTINO
AD AMATRICE.

Relatore

Prof. Antonia Teresa Spanò

Candidato

Alessia Rosignuolo

Anno Accademico 2017/2018

*“Dedicato alla mia super Nonna,
che non c'è più, ma che fino all'ultimo
ha sognato di vedermi laureata.”*

INDICE

<u>INTRODUZIONE</u>	4
<u>1. LA GEOMATICA. TECNICHE E STRUMENTI PER IL RILIEVO METRICO</u>	9
1.1. I SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI	12
1.2. IL RILIEVO METRICO INTEGRATO	16
1.2.1. IL RILIEVO TOPOGRAFICO.....	19
• GLI STRUMENTI TOPOGRAFICI.....	20
1.2.2. IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO	25
• FONDAMENTI GEOMETRICI DELLA FOTOGRAMMETRIA	27
• FONDAMENTI ANALITICI DELLA FOTOGRAMMETRIA	28
• I CAMPI APPLICATIVI DELLA FOTOGRAMMETRIA	29
• GENERAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI.....	32
1.2.3. I SISTEMI A SCANSIONE LASER.....	33
• LE TIPOLOGIE DI STRUMENTI A SCANSIONE LASER	35
• FASE DI RILEVAMENTO E ELABORAZIONE DATI	37
<u>2. IL CASO STUDIO DI SANT’AGOSTINO AD AMATRICE</u>	39
2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	39
2.2. CENNI STORICI	42
2.2.1. RIFERIMENTI CRONOLOGICI DI AMATRICE.....	42
2.2.2. RIFERIMENTI CRONOLOGICI DELLA CHIESA DI SANT’AGOSTINO	47
2.3. IL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA	51
<u>3. ANALISI DEL CASO STUDIO</u>	54
3.1. LE CAMPAGNE DI RILIEVO	54
3.2. ELABORAZIONI DEI DATI DEI RILIEVI	58
3.2.1. ELABORAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI.....	58
3.2.2. ESTRAZIONE DELLE ORTOFOTO.....	60
3.3. DOCUMENTAZIONE D’ARCHIVIO	62
3.4. RICOSTRUZIONE DELLO STATO DI FATTO PRIMA DEL SISMA	72

• TAVOLA 1: CONFRONTO RILIEVI 1980 – ORTOFOTO T1	74
• TAVOLA 2: CONFRONTO RILIEVI 1980 – ORTOFOTO T1	75
• TAVOLA 3: RICOSTRUZIONE T0 – PIANTA	76
• TAVOLA 4: RICOSTRUZIONE T0 – PROSPETTO PRINCIPALE.....	77
• TAVOLA 5: RICOSTRUZIONE T0 – FRONTE SUD-EST	78
• TAVOLA 6: RICOSTRUZIONE T0 – FRONTE NORD-OVEST.....	79
• TAVOLA 7: RICOSTRUZIONE T0 – FRONTE EST	80
3.5. ANALISI MULTI-TEMPORALE DEL CASO STUDIO.....	81
3.5.1. ANALISI MULTI- TEMPORALE DEI CROLLI.....	83
• TAVOLA 8: T1- SETTEMBRE 2016	85
• TAVOLA 9: T2 - DICEMBRE 2016	88
• TAVOLA 10: T3 - FEBBRAIO 2017	91
3.5.2. ANALISI MULTITEMPORALE DELLE LESIONI.....	92
• TAVOLA 11: T1- T2 – T3 PROSPETTO PRINCIPALE.....	94
• TAVOLA 12: T1- T2 – T3 FRONTE SUD-EST.....	96
• TAVOLA 13: T1- T2 – T3 FRONTE NORD-OVEST	98
• TAVOLA 14: T1- T2 – T3 FRONTE EST	100
<u>4. CONCLUSIONI</u>	<u>102</u>
<u>INDICE DELLE FIGURE</u>	<u>104</u>
<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	<u>106</u>
<u>SITOGRAFIA</u>	<u>109</u>
<u>RINGRAZIAMENTI.....</u>	<u>ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.</u>

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito di un progetto di ricerca, svolto dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino (DAD, Dipartimento di Architettura e Design e DIATI, Dipartimento Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture).

Esso verte sull'impiego delle tecniche e strumentazioni innovative del rilievo metrico, al fine di fornire un quadro conoscitivo più approfondito circa i crolli e le lesioni causati da eventi sismici. L'obiettivo sarà quello di realizzare elaborati grafici derivati da nuvole di punti, generate con l'impiego delle moderne tecniche della Geomatica, a confronto con rilievi storici. Ciò che ci si prefigge di raggiungere sarà di realizzare un metodo di analisi di confronto tra lesioni e problematiche già esistenti con quelle rilevate dopo un recente evento sismico. Lo scopo sarà, quindi, quello di evidenziare anomalie strutturali già esistenti prima di un evento sismico, per poter ricostruire uno stato di fatto in diverse fasi temporali del manufatto architettonico colpito.

Come riportato della Protezione Civile, "l'Italia è uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo, per la frequenza dei terremoti che hanno storicamente interessato il suo territorio e per l'intensità che alcuni di essi hanno raggiunto, determinando un impatto sociale ed economico rilevante."¹ L'intensità degli eventi sismici, come ben sappiamo, viene misurata secondo due scale: la scala Richter, che fornisce la quantità di energia liberata detta

¹ Tratto dall'articolo online della Protezione Civile Imbersago, "L'Italia è un paese ad alto rischio sismico",
<http://www.protezionecivile-imbersago.com/rischio-sismico.html>

magnitudo, e la scala Mercalli che per definizione “classifica l'intensità di un terremoto in base agli effetti delle scosse sismiche sulla popolazione, sui manufatti e sull'ambiente.”²

Nel nostro Paese sono stati stimati, in circa 2500 anni, oltre 30.000 terremoti di cui 560 di intensità uguale o superiore all'VIII grado della scala Mercalli, ossia scosse che hanno provocato seri danni al patrimonio edilizio. I restanti, invece, sono stati valutati con un'intensità pari o superiore al IV-V grado, ovvero con scosse percepite da gran parte delle persone e lievi lesioni alle costruzioni.³ Nello specifico il problema che colpisce il nostro territorio si basa sul rapporto tra i danni prodotti dai terremoti e l'effettiva intensità degli eventi sismici. La Penisola italiana rispetto ad altri Paesi, nei quali la pericolosità sismica è maggiore, risulta caratterizzata da una vulnerabilità sismica molto elevata data dalla notevole fragilità del suo patrimonio edilizio e per la presenza di un eccezionale patrimonio storico e monumentale.

L'indice di vulnerabilità sismica, in termini tecnici, “è un valore numerico che viene utilizzato per riassumere gli esiti di una valutazione di vulnerabilità sismica, da un punto di vista numerico [...] è dato dal rapporto tra la capacità resistente del fabbricato e la domanda in termini di resistenza o spostamento prevista dalla Normativa Tecnica”.⁴

² Jay Phelan, Maria Cristina Pignocchino “Scopriamo le scienze della Terra”, Zanichelli editore 2018.

³ Dati raccolti da scheda tecnica on-line Protezione Civile Nazionale, “La sismicità in Italia”.

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/schede_tecniche.wp?contentId=SCT20122

⁴ Studio di ingegneria DAR, “Che cos'è la vulnerabilità sismica”, 2017.

<http://www.studioingegneriadar.it/vulnerabilita-sismica/>

Dati l'intensità dei terremoti registrati ed un alto indice di vulnerabilità sismica del nostro territorio, negli ultimi quaranta anni, sono stati valutati danni economici consistenti, impiegati per il ripristino e la ricostruzione post-evento. A ciò si devono ulteriormente aggiungere le conseguenze, non traducibili in valore economico, sul patrimonio storico, artistico e monumentale. In seguito ad un evento sismico, gli enti competenti svolgono un lavoro di indagine sull'iter costruttivo, ossia si occupano dell'assegnazione di appalti, progettazione, edificazione e manutenzione rispetto alle norme antisismiche⁵ degli edifici coinvolti.

A tal proposito, il presente lavoro si propone di studiare un metodo di indagine post-sisma con l'utilizzo di tecniche e strumentazioni avanzate impiegate dalla disciplina della Geomatica. Quest'ultima è una disciplina che si occupa di tutte quelle tecniche di rilievo e di trattamento dei dati rilevati, che sono alla base della conoscenza della forma di alcune proprietà fisiche di oggetti di dimensioni finite, esistenti o esistenti, che ne permettono la strutturazione nelle banche dati per l'utilizzo finale. Lo scopo di inserire questa disciplina nel campo dell'emergenze è quello di fornire output informativi, che permettano di definire l'entità di persone e beni coinvolti per la messa in sicurezza e per un rapido ritorno alla normalità, compreso il recupero precoce di edifici e infrastrutture.

Negli ultimi anni, si è assistito ad un sempre più rapido sviluppo delle tecniche e strumentazioni di rilievo geometrico, che offrono il vantaggio di poter descrivere e monitorare ampie zone di territorio, consentono di ottenere una grande quantità di dati in tempi

⁵ Le fasi di indagine sull'iter costruttivo degli edifici devono essere conformi alla "Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC 2018" entrata in vigore il 22 Marzo 2018.

considerevolmente ridotti, rispetto alle operazioni di rilevamento tradizionali.

Nel presente studio, particolare attenzione verrà posta al caso studio della Chiesa di Sant'Agostino, fondata nel 1428 e situata nella parte Sud-Est del comune di Amatrice in provincia di Rieti. Tale fabbricato è stato colpito dal recente terremoto del Centro Italia, in particolare, da una prima forte scossa di magnitudo 6.0 il 24 Agosto 2016 e successivamente da altre due scosse nei mesi di Ottobre 2016 e Gennaio 2017 di circa pari intensità.

Il Team Direct⁶, che ha operato all'interno della task force del Politecnico di Torino⁷, in collaborazione con il nucleo SAPR, (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto), dei vigili del fuoco e la GEER Association, (Geotechnical Extreme Events Reconnaissance⁸), hanno eseguito sull'area una serie di rilievi fotogrammetrici aerei e terrestri. Le elaborazioni dei dati rilevati sono state integrate a documenti di rilievo, eseguiti con tecniche tradizionali, risalenti al 1980, in possesso della Soprintendenza. Ciò ha reso possibile l'individuazione delle lesioni alla struttura, già presenti prima dell'evento sismico, e successivamente un'analisi multi-temporale delle tre fasi di crollo che hanno colpito il complesso architettonico.

Nel primo capitolo, di questa tesi, verranno riassunte le nozioni teoriche delle metodologie e degli strumenti impiegati per

⁶ Team DIRECT, Disaster Recovery Team: gruppo di studenti che fanno parte delle aree di architettura e quelle di ingegneria che hanno come obiettivo la realizzazione e il mantenimento di una formazione studentesca continua nel campo delle tecnologie avanzate del Rilievo Metrico 3D e del Telerilevamento con tecniche innovative.

⁷ Gruppo di esperti di geomatica, geotecnica e geofisica del Politecnico attivato in accordo con la protezione civile e Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia.

⁸ Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association organizzazione di volontari di esperti sulla scienza della terra che si occupano di rispondere agli eventi estremi geotecnici.

l'acquisizione e l'elaborazione dei dati. La fase di rilevamento di un edificio è utile a comprendere l'architettura in tutti i suoi aspetti metrici, geometrici e storici per poi poter compiere una lettura critica dello stesso. Fornendo, quindi, un quadro teorico generale delle metodologie, si auspica a rendere il presente lavoro di contributo alle attuali indagini in merito al supporto delle emergenze sismiche e, pertanto, consultabile da tecnici esperti.

Nel capitolo successivo verrà presentato il caso di studio ponendo l'attenzione all'inquadramento territoriale in cui è situato il manufatto e grazie alle fonti bibliografiche e iconografiche reperite, verrà fatto riferimento ai principali eventi storici che hanno coinvolto la città e il manufatto fin dalle origini.

Infine, l'attenzione verrà posta sul lavoro di ricerca condotto sulla chiesa di Sant'Agostino, colpita e parzialmente demolita dai terremoti del 2016 e 2017 del Centro Italia. Lo scopo sarà quello di spiegare il ruolo fondamentale che hanno assunto la disciplina della Geomatica e i documenti storici reperiti, per lo studio dell'analisi multi-temporale riguardante le tre diverse situazioni temporali durante lo sciame di terremoti. Verrà, quindi, redatto un approfondimento sull'evento catastrofico che ha colpito il Centro Italia per poi affrontare nello specifico l'analisi svolta sulla chiesa.

1. LA GEOMATICA. TECNICHE E STRUMENTI PER IL RILIEVO METRICO

La Geomatica è definita come "l'insieme di discipline e tecniche che mira a fornire un vitale supporto nella gestione del territorio per un'adeguata misura delle condizioni territoriali statiche e per l'identificazione e l'analisi delle possibili evoluzioni dinamiche, in modo da conoscere e prevedere situazioni di pericolosità e di rischio al servizio di possibili attività di allerta in condizioni operative prossime a quelle del tempo reale".⁹ Essa risponde all'esigenza di trattare, in modo interdisciplinare e interoperabile, grandi quantità di dati e di informazioni da questi derivate, per la misura e la rappresentazione del territorio e degli ambiti urbani fino all'edificio e le sue parti.

Tali dati, quindi, necessitano di essere organizzati, elaborati, gestiti, rappresentati in elaborazioni digitali e numeriche e utilizzati in tempi brevi, per una corretta rappresentazione e una buona conoscenza della situazione nella sua totalità.

"La scienza della Geomatica comprende una serie di discipline e di tecniche, che ne determinano la base costitutiva":¹⁰

l'informatica: applicata tramite software e apparecchi tecnologici, allo scopo di realizzare elaborati che rappresentino le informazioni raccolte;

⁹ Maurizio Fea, Mario Angelo Gomasasca "Geomatica per la gestione del territorio" Enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2008). [http://www.treccani.it/enciclopedia/geomatica-per-la-gestione-del-territorio_\(XXI-Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/geomatica-per-la-gestione-del-territorio_(XXI-Secolo)/)

¹⁰ M.A. Gomasasca, "Basics of Geomatics", DOI 10.1007/978-1-4020-9014-1_1, Springer Science+Business Media B.V., 2009

la cartografia: impiegata per l'analisi morfologica del territorio e degli elementi che lo costituiscono, naturali e non, "mediante rappresentazioni grafiche o numeriche di zone più o meno ampie della superficie secondo regole prefissate"¹¹;

la topografia: disciplina che raccoglie l'insieme delle tecniche di rilievo metrico;

la fotogrammetria: scienza che consente di rilevare, attraverso un'accurata misurazione, le caratteristiche e le forme di un oggetto, con l'utilizzo di fotogrammi che raffigurano l'oggetto stesso;

le tecniche di scansione laser: utili al rilevamento metrico di oggetti per ottenere una restituzione degli stessi in formato tridimensionale;

i sistemi Global Positioning System (GPS) o GNSS (Global Navigation Satellite System (GNSS): validi strumenti grazie ai quali è possibile ottenere la posizione tridimensionale di punti o oggetti nello spazio e nel tempo, in qualsiasi punto della terra, in modo costante;

"i Sistemi informativi territoriali (SIT) o Geographic information systems (GIS): "strumenti utili all'archiviazione e gestione informatizzata dei dati grazie alla possibilità di analizzare e integrare nel tempo dati alfanumerici con riferimento spaziale e geografico."¹²

Tra questi, vengono citati i metodi topografici e fotogrammetrici, i quali originariamente, sono stati sviluppati e messi a punto per il solo rilevamento del territorio e per la conseguente produzione cartografica. Il rapido sviluppo della strumentazione

¹¹ Maurizio Fea, Mario Angelo Gomasca "Geomatica per la gestione del territorio" Enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2008). [http://www.treccani.it/enciclopedia/geomatica-per-la-gestione-del-territorio_\(XXI-Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/geomatica-per-la-gestione-del-territorio_(XXI-Secolo)/)

¹² Antonia SPANÒ, Elisabetta DONADIO, Filiberto CHIABRANDO "Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili" in Polymnia. Studi di Archeologia n.08 /2017.

impiegata e l'integrazione delle tecniche innovative di rilievo a scansione laser hanno permesso l'instaurarsi dell'approccio metrico-numerico e quindi di poter porre l'attenzione anche a oggetti a scala più grande: beni architettonici.

Si è assistito, negli anni, all'applicazione di metodi e strumenti innovativi che, associando la natura fotografica a quella metrica, producono elaborati finali, quali ad esempio ortofoto di precisione¹³. Quest'ultimi risultano particolarmente vantaggiosi poiché accrescono le possibilità di lettura tematica degli oggetti architettonici. In scala architettonica, quindi, l'utilizzo simultaneo di tutti gli strumenti e metodi sopra citati, garantisce un rilievo dotato di precise caratteristiche detto rilievo metrico. Esso è caratterizzato da una natura numerica, poiché nasce da valori numerici corrispondenti alle coordinate spaziali di punti, in un sistema di riferimento prescelto, e da una natura tridimensionale. L'elaborazione dei dati conduce, quindi, sia a disegni architettonici tradizionali, di natura bidimensionale, sia a modelli virtuali che, supportati dalle tecniche di computer grafica, hanno un ricco potere comunicativo ed al contempo possono configurarsi come rappresentazioni di estrema sintesi del processo di conoscenza compiuto.

Nei paragrafi seguenti, verranno approfonditi i metodi e le strumentazioni principali impiegati nel rilievo del caso studio del presente lavoro di tesi. Lo scopo è quello di presentare una metodologia applicabile a un qualsiasi manufatto architettonico nell'ambito dell'analisi post-sisma.

¹³ "L'ortofoto di precisione è una rappresentazione bidimensionale ottenibile a partire da un modello di fotogrammi orientati, per i quali cioè, è stata determinata l'esatta posizione del centro di presa nel momento dell'acquisizione dei fotogrammi." Antonia SPANÒ, Elisabetta DONADIO, Filiberto CHIABRANDO "Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili" in Polymnia. Studi di Archeologia n.08 /2017.

1.1. I SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI

I Sistemi Informativi sono nati dall'esigenza di poter disporre di strumenti utili alla raccolta, all'elaborazione e alla divulgazione di molteplici informazioni. Essi sono quindi l'insieme di risorse materiali, quali apparecchiature e software, risorse umane e procedure che hanno il compito di acquisire, organizzare, elaborare e restituire i dati, riguardanti una determinata tematica. Lo scopo di questo tipo di sistemi è quello di rendere accessibili, a un personale esperto in decisioni operative, tutte quelle informazioni utili a ponderare delle scelte opportune.

Nel campo della disciplina della Geomatica, vengono impiegati quei sistemi definiti territoriali ovvero sistemi progettati per operare con dati riferiti allo spazio geografico. In altre parole, un SIT, Sistema Informativo Territoriale, è una struttura costituita da un potente insieme di strumenti, tecnologie e persone utile all'acquisizione, archiviazione, gestione, trasformazione, analisi e visualizzazione di dati spaziali georeferenziati. Viene creato, quindi, un modello che consente di conoscere il territorio, in modo da poter operare in maniera più consapevole in tutte quelle attività di pianificazione, gestione e di valutazione di interventi.

Un SIT nello specifico è composto da hardware, procedure applicative, banche dati, persone e software. Quest'ultimi vengono comunemente chiamati software "GIS", Geographic Information System. Per definizione tali software sono "un potente insieme di strumenti utilizzati per raccogliere, memorizzare, richiamare, modificare e visualizzare dati spaziali" (Burrough, 1986).

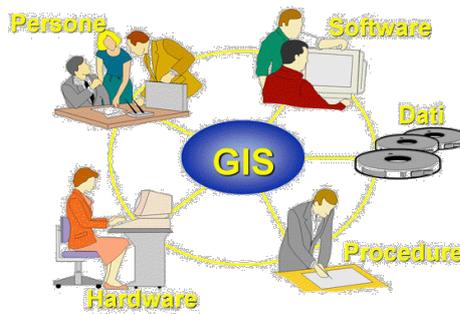


Figura 1.1. Schema sintetico delle componenti di un GIS.

La tecnologia GIS è quindi il contenitore delle informazioni territoriali che, opportunamente gestite, conducono alla realizzazione di mappe tematiche relative ai molteplici aspetti del territorio: mappe catastali, carte geo-ambientali, carte tecniche regionali, ecc.

I primi software GIS arrivano sul mercato intorno agli anni '80, “consentendo per la prima volta di associare in modo funzionale la cartografia informatizzata, organizzata in strati tematici, con la tecnologia dei database.”¹⁴ Differentemente dalla cartografia tradizionale, che vede in un unico strato informativo una serie di informazioni illustrate da una legenda, un archivio di dati geografici GIS è composto da diversi strati tematici separati e sovrapposti in un unico sistema di riferimento.

Le tipologie di dati geografici, che possono essere gestiti all'interno di un software GIS per poter essere georeferiti, sono: i dati vettoriali, rappresentazioni grafiche basate su entità elementari (punti, linee, aree) che creano oggetti complessi; i dati raster, ovvero immagini rappresentati attraverso i pixel, sotto forma di celle di forma regolare; i dati alfanumerici, i quali rappresentano le informazioni di ogni singolo dato geometrico.

¹⁴ <https://www.docsity.com/it/sistemi-informativi-territoriali-3/468711/>

Un dato geografico quindi, si compone tipicamente di tre tipi di informazioni: localizzazione (coordinate), attributi (codici, misure, toponimi, e tutti gli altri eventuali attributi dell'oggetto) e topologia (generata automaticamente dal sistema, "è un insieme di regole per definire in maniera esplicita le relazioni, i rapporti di connessione e di continuità tra gli elementi spaziali e per collegare tali elementi alle relative descrizioni (attributi). In un modello dati topologico, ad esempio, è possibile riconoscere le aree contigue e identificare le linee che delimitano ciascuna superficie (confini)."¹⁵

Il formato dei dati gestito, all'interno del software GIS, è lo shapefile. Fu presentato per la prima volta all'inizio degli anni Novanta dal produttore ESRI con ArcView GIS v.2.¹⁶

All'interno di un progetto GIS, questi shapefile in relazione tra loro, contengono in un unico insieme di dati la geometria e gli attributi di un'entità spaziale, cioè punti, linee o poligoni. Tutti i file che lo costituiscono, quindi, devono essere nominati allo stesso modo e ciò che li differenzia è l'estensione.

Essi devono essere almeno tre:

- nomefile.shp: gruppo di file che comprende tutte le informazioni geometriche;
- nomefile.dbf: gruppo di file che comprende tutte le informazioni di tipo tabellare (dati attributo);
- nomefile.shx: è definito come file indice, poiché permette di collegare alla geometria le informazioni di tipo tabellare.

¹⁵http://redazione.regione.campania.it/farecampania/scaffale_formativo/ARCHIVIO/2002%20Cave%20e%20Torbiere/corsogis.pdf

¹⁶ B. Guandalini, G. Salerno, Manuale di ArchGIS 10.

Un sistema GIS è, quindi, un potente strumento in grado di trattare dati di varia natura, riferirli ad una collocazione spaziale e rappresentarli ed elaborarli in risposta a specifiche interrogazioni. Grazie a queste caratteristiche un GIS, rispetto ad altri comuni sistemi informativi, trova applicazione in ambiti differenti tra loro ma accomunati dalla possibilità di essere comunque collegati ad una posizione geografica.

Ad esempio, può essere impiegato per localizzare una nuova attività commerciale, individuare il suolo migliore per coltivare un prodotto specifico, trovare il percorso ottimale per un veicolo d'emergenza o analizzare e trovare soluzioni adeguate per i fenomeni di inquinamento, deforestazione, sovrappopolazione o disastri ambientali.

Nel caso di disastri ambientali, la Protezione Civile utilizza gli innovativi software GIS per generare possibili coperture di erosione, "attraverso la sovrapposizione di dati territoriali relativi agli aspetti geologici, topografici, di uso del suolo, o per simulare eventi catastrofici, analizzando le aree abitate interessate e prevedendo come, dove e quando intervenire per arginare i danni ed evacuare le zone colpite."¹⁷

¹⁷https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/17570/mod_resource/content/1/02_Sistemi%20Informativi%20e%20GIS_2014.pdf

1.2. IL RILIEVO METRICO INTEGRATO

È doveroso premettere che con il termine rilievo, non si indica solo una procedura utile all'acquisizione di misure, bensì rappresenta un vero e proprio processo di studio con delle finalità, che ne determinano il percorso di acquisizione.

“Occorre sapere prima ciò che si deve disegnare e tener presente che non è il prospetto, la pianta e la sezione, come immagini, a cui si vuol pervenire in prima istanza, quanto la rappresentazione dello spazio fisico, della qualità architettonica e le trasformazioni strutturali avvenute nell'opera stessa (...) il rilievo architettonico è un'operazione volta a capire l'opera nella sua globalità (...); rilevare quindi significa innanzitutto comprendere l'opera che si ha davanti, coglierne tutti i valori, da quelli dimensionali a quelli costruttivi, da quelli formali a quelli culturali.”¹⁸

Il rilievo è, quindi, un potentissimo strumento di conoscenza dell'organismo architettonico e di rappresentazione grafica di tutte le sue componenti. La decisione di operare con una tecnica di rilievo rispetto ad un'altra dipenderà, pertanto, dal tipo di informazioni che si vogliono trasmettere attraverso il rilievo.

È ormai consuetudine svolgere le operazioni di rilevamento di beni ambientali e architettonici tramite l'integrazione di metodi consolidati, quali topografici e fotogrammetrici, integrati ai moderni metodi di rilevamento a scansione laser. L'impiego dell'approccio metrico-numerico, precedentemente utilizzato nella sola sfera territoriale, per l'elaborazione cartografica si è oggi stabilito, con i

¹⁸ Mario Docci, Diego Maestri, “Manuale di rilevamento architettonico e urbano”, Bari, Laterza, 2008

dovuti adeguamenti, nel campo del rilievo architettonico.¹⁹ Tale approccio consente di ottenere un rilievo dotato di precise caratteristiche che lo definiscono quindi rilievo metrico. L'applicazione di questi metodi con il continuo avanzare delle strumentazioni consente oggi di associare alla natura fotografica quella metrica, permettendo un'analisi dell'oggetto architettonico più approfondita.

A questo proposito è bene distinguere i metodi di rilievo metrico che possono essere impiegati. Questi differiscono dalle strumentazioni e dalle procedure applicate e, nella maggior parte dei casi, è inevitabile una combinazione dei metodi in quanto la scelta discenderà sia dall'informazione che si vuole ottenere sia dal contesto. Per tale motivo viene anche definito rilievo "integrato".

I metodi di rilievo metrico sono:

Rilievo topografico classico e satellitare: riguardano metodi di misurazione effettuati con strumenti di grande precisione che elaborano una serie di calcoli più o meno complessi al fine di ottenere una traduzione grafica degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali. La rappresentazione finale del rilievo avrà quindi "una natura numerica, poiché nasce da valori numerici che corrispondono alle coordinate spaziali di punti in un sistema di riferimento prescelto"²⁰.

Rilievi metrici di dettaglio 3D, fotogrammetrici e laser scanning: si basano sulla misurazione per collimazione visiva dei punti per mezzo di camere fotografiche più o meno complesse. Questo tipo di tecniche sono anch'esse utilizzate per rilevamenti di precisione,

¹⁹ A. Spanò Slide sui "Principi del rilievo metrico", 2015-2016

²⁰ ibidem

andamenti planimetrici di grande estensione, soprattutto per il rilievo di facciate piane e fronti urbani.

Le tecniche a cui si farà riferimento, in questo capitolo, saranno le tecniche di rilievo topografico, fotogrammetrico e laser scanning. Esse, come già precisato, permettono il rilevamento di oggetti difficilmente accessibili, come nel caso dell'oggetto di studio di questo lavoro di tesi. Il manufatto colpito dal terremoto, sia per motivi di sicurezza che per le macerie, non presentava, infatti la possibilità di potervi accedere.

1.2.1. IL RILIEVO TOPOGRAFICO

La topografia, il cui termine derivante dal greco è composto da “topos” cioè luogo e “graphos” ovvero grafia, è una disciplina che ha lo scopo di studiare i metodi, i procedimenti, i modelli di calcolo e le strumentazioni finalizzate “alla determinazione indiretta di coordinate tridimensionali, tramite la misura di angoli e distanze”.²¹

Con il termine rilievo topografico, si vogliono indicare tutte le tecniche e le strumentazioni utili all'elaborazione finale, in scala, di un edificio o di una porzione zona. Il rilievo topografico classico (o rilievo indiretto) permette di effettuare le misurazioni, non direttamente sull'oggetto per mezzo di strumenti semplici, ma utilizzando strumenti tecnologicamente avanzati, che consentono l'acquisizione dei dati determinando le coordinate tridimensionali, tramite la misura di angoli e distanze. Grazie all'evoluzione della tecnologia è oggi possibile rilevare grandezze, quali il tempo e le distanze, utilizzando strumenti topografici satellitari.

Entrambi gli approcci oggi vengono impiegati per “l'impianto di reti topografiche (o geodetiche) di inquadramento [...]; questa fase ha il ruolo di stabilire un unico sistema di riferimento delle misure e di consentire la georeferenziazione, ovvero il riferimento ad un sistema cartografico globale.”²²

Il rilievo topografico, satellitare e classico, vengono effettuati dall'operatore con l'ausilio di strumenti topografici, con il requisito fondamentale che tutti i punti da rilevare debbano essere visibili mediante lo strumento.

²¹ Roggero Marco, “Manuale di Rilevamento diretto del corso di Laboratorio di geomatica per la modellazione dell'architettura”, Settembre 2009.

²² A. Spanò Saggio “Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica” raccolta a cura di Rosalba Ientile, Monica Naretto, Celid, Luglio 2013.

- GLI STRUMENTI TOPOGRAFICI

Per effettuare un corretto rilievo, l'operatore ha a disposizione strumenti specifici con lo scopo di misurare precise classi di grandezze ovvero direzioni, distanze e dislivelli.

GNSS (Global Navigation Satellite System): potente sistema utilizzato, durante i rilievi topografici, per conoscere la posizione spaziale dei punti terrestri, grazie a costellazioni di satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra. Tale costellazione si compone di 24 satelliti artificiali che ruotano intorno alla terra, secondo orbite fisse, ad una distanza di circa 20.000 km.

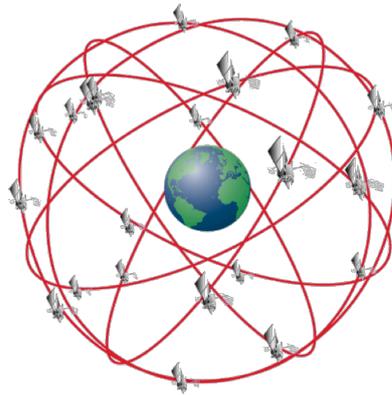


Figura 1.2. Rappresentazione della costellazione di Satelliti²³

La fase di acquisizione si basa sul calcolo del tempo che impiega il segnale, emesso dal satellite, a raggiungere l'antenna di ricezione collocata sul punto da rilevare.

Durante la realizzazione di un rilievo topografico con l'impiego di questi strumenti è possibile misurare in modalità statica i vertici, posizionati in un unico sistema di riferimento, di una rete di

²³<https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60683-precise-gps-receiver-position>

inquadramento che ingloba l'area che circonda il manufatto da rilevare.

Oppure è possibile determinare il posizionamento satellitare di un punto, con il metodo denominato RTK (Real Time Kinematic). Esso è "un metodo di posizionamento *differenziale* che usa due ricevitori contemporaneamente."²⁴ Questa tecnica, che può essere utilizzata in situazioni di assenza di ostacoli in vaste porzioni di "sfera celeste per la captazione del segnale satellitare"²⁵, è spesso eseguita per creare l'appoggio topografico a terra dei rilievi effettuati mediante fotogrammetria UAV. Pertanto, questo metodo non viene utilizzato in prossimità di edifici, bensì risulta efficace per il rilevamento delle zone di contesto in cui si inseriscono i manufatti da rilevare.

Al fine di garantire il calcolo delle coordinate di ogni punto della superficie terrestre, per il sistema GPS, le orbite sono calcolate in modo da essere visibili da almeno quattro satelliti.

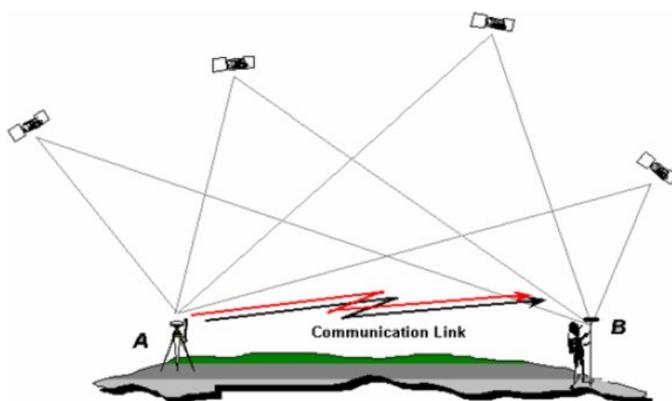


Figura 1.3. Schema modalità RTK.²⁶

²⁴ Paolo Corradeghini, "Che cosa devi sapere per usare un GPS di precisione"
<https://3dmetrica.it/gps-nel-rilievo-topografico/>

²⁵ A. Spanò Saggio "Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica" raccolta "Patrimonio architettonico e rischio sismico. Un percorso tra conoscenza e obiettivi di conservazione" Rosalba Ientile, Monica Naretto, Celid, Luglio 2013.

²⁶ <https://drotek.com/section/quest-ce-que-le-rtk-2/>

Il primo ricevitore, la base, è fisso e posizionato su un treppiede fermo su un punto, infatti è consuetudine durante le operazioni di rilievo GNSS “appoggiarsi” su una rete di stazioni fisse, presenti su gran parte del territorio. L'altro ricevitore, chiamato Rover, viene invece spostato manualmente su di una palina sui vari punti da “battere”, ovvero sui punti di cui si vuole conoscere l'esatta posizione spaziale.



Figura 1.4. Ricevitore fisso GNSS²⁷



Figura 1.5. Ricevitore mobile “Rover” GNSS²⁸

Nell'organizzazione e realizzazione di un rilievo è opportuno creare, inizialmente, una rete di inquadramento nel quale verranno riportati tutti i risultati ottenuti dalle operazioni di misura. Questa risulta utile a definire il sistema di riferimento locale o sempre più frequentemente globale, che è facilmente raggiungibile in quanto le misure GNSS lavorano in un sistema di riferimento geocentrico. La funzione dei vertici, della rete di inquadramento, è fondamentale in quanto essi sono utili a inserire correttamente il rilievo in un sistema di riferimento definito, locale o cartografico e quindi nazionale.

²⁷ Archivio fotografico stage con il Team Direct nelle aree colpite dal sisma “Torre San Severino” Febbraio 2017.

²⁸ Archivio fotografico stage con il Team Direct nelle aree colpite dal sisma “Torre San Severino” Febbraio 2017.

La stazione totale: potente strumento di precisione utilizzato, oggi, come apparecchio di integrazione alle tecniche di fotogrammetria. In passato questo strumento veniva impiegato per tutte le operazioni di misurazione in scala territoriale e architettonica. Oggi la continua evoluzione tecnologia, "ha determinato l'impiego di questo metodo prevalentemente a integrazione di altri".²⁹ Il rilievo topografico, mediante stazione totale, viene oggi utilizzato per la creazione di punti di appoggio ai rilievi fotogrammetrici.

La misurazione delle distanze avviene per mezzo di un impulso elettromagnetico, di cui viene calcolato il tempo di volo che occorre per colpire il punto da rilevare, essere riflesso e ritornare allo strumento e inoltre, la differenza di fase della sua onda elettromagnetica nel momento in cui la riceve dopo la riflessione. Mentre la misurazione degli angoli avviene, invece, per mezzo di calcoli compiuti dallo strumento stesso.

La stazione totale è costituita da:

- Un treppiede su quale viene posizionata la stazione totale.
- una basetta dotata di viti regolabili che permette il posizionamento e la messa in bolla dello strumento su un treppiede;
- un basamento costituito da una livella che supporta la stazione;
- L'alidda, anch'essa dotata di una livella torica e di un cerchio per la misurazione di angoli zenitali;
- un cannocchiale, utile alla misurazione di punti a distanza.

²⁹ A. Spanò Saggio "Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica" Celid, Luglio 2013.



Figura 1.6. Stazione totale Leica.



Figura 1.7. Prisma Leica

Per questo strumento esistono due metodi di impiego. Il metodo utilizzato maggiormente è quello che si basa sulla misurazione di punti di controllo, segnalati con target a scacchiera, distribuiti in maniera uniforme su tutta la superficie da rilevare. Essi risultano essere indispensabili per la registrazione delle nuvole di punti e delle scansioni laser terrestri in un unico sistema di riferimento.

Questo metodo di rilevamento topografico, è spesso impiegato a supporto delle tecniche satellitari GNSS/GPS, con la tecnica di misurazione tramite riflessione: o da un prisma, strumento apposito posto sul punto (o vertice) da rilevare, o per riflessione direttamente sulla superficie stessa dell'oggetto.

La stazione totale è, quindi, l'evoluzione tecnologica che vede in un unico strumento l'integrazione del teodolite, impiegato per le misurazioni angolari, con un distanziometro. Con i recenti sviluppi tecnologici, tali strumenti sono dotati di computer di bordo che agevolano le operazioni di misura.

Le stazioni totali vengono impiegate, quindi, sia per il rilievo architettonico e/o archeologico di dettaglio ma anche per la correzione della fotogrammetria, per l'allineamento delle scansioni del laser scanner e per la mosaicatura delle immagini trasformate mediante omografia.

1.2.2. IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Dopo il 1839, anno a cui si riporta l'invenzione della fotografia³⁰, si decise di integrare alle operazioni di rilievo tradizionale per punti quello realizzato con fotografie. Nasce così la fotogrammetria che per definizione "è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche analogiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici."³¹

Tale operazione di rilievo è resa possibile grazie all'impiego di speciali camere che producono fotografie, denominati fotogrammi quando l'uso è per fini metrici, sulle quali è possibile eseguire misure di precisione. I fotogrammi avranno, quindi, una natura digitale e potranno essere prodotte da sensori montati nelle macchine digitali o tramite scansioni.

La natura digitale, dei fotogrammi, è caratterizzata da matrici numeriche che rappresentano il contenuto radiometrico e da una coppia di coordinate che ne descrivono la posizione. Tali caratteristiche sono contenute nei pixel, componenti elementari di dimensione e posizione fissa. Dai risultati ottenuti da un rilievo fotogrammetrico è possibile ottenere modelli tridimensionali.

³⁰ Invenzione riconducibile allo studioso e uomo politico François Jean Dominique Arago, il quale spiegò nei dettagli all'Accademia di Francia l'invenzione di Louis Mandé Daguerre, la dagherrotipia. Ma, indubbiamente oltre a lui, la fotografia ha almeno un altro padre: il fisico inglese William Henry Fox Talbot, inventore della fotografia come noi oggi la intendiamo, ovvero una matrice riproducibile potenzialmente all'infinito.

<https://www.nikonschool.it/corso-breve-storia-fotografia/1839.php>

³¹ The American Society for Photogrammetry and Remote sensing, "Manual of Photogrammetry", 1980.

Questi, non rappresentano una nuova tecnica, poiché si rifanno ai modelli tradizionali di rappresentazioni quali "proiezioni ortogonali organizzate in piante, prospetti e sezioni, modelli 3D dalla geometria schematizzata e generati da entità geometriche piane, da superfici dalla semplice geometria di traslazione o rotazione, superfici cioè di equazione nota" che "possono essere texturizzati mediante immagini controllate per via fotogrammetrica."³²

Grazie al passaggio alla fotogrammetria digitale, dall'elaborazione delle immagini acquisite è possibile estrarre informazioni 3D dai fotogrammi identificando i punti coniugati che riprendono lo stesso oggetto da centri di presa diversi, con operazioni automatizzate.³³

In seguito a questa operazione, che automatizza la determinazione dei centri di presa, si possono generare, sempre automaticamente, nuvole di punti che sfruttano algoritmi Structure from Motion (SfM). La tecnica SfM, derivante dalla disciplina della "Computer Vision", permette di "stimare la posizione 3D di punti rappresentati in molteplici immagini, ricostruendo la geometria dell'oggetto rappresentato (structure) e la posizione delle prese (motion) anche quando non si è in possesso di definiti parametri di calibrazione della camera."³⁴

³² A. Spanò "Slide corso di Fotogrammetria e Scansione Laser 3D" 2015/16

³³ Elisabetta Colucci "Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto Sostenibile, Architettura e natura di paesaggi archeologici" relatore A. Spanò, corelatore D. Brocchini, F. Chiabrando, F. Noardo, Marzo 2017.

³⁴ Antonia T. Spanò "Slide corso di Fotogrammetria e scansione 3D", 2015-2016

- FONDAMENTI GEOMETRICI DELLA FOTOGRAMMETRIA

Come già precisato con il rilievo fotogrammetrico, quindi, è possibile ottenere dati metrici da un fotogramma poiché esso viene considerato prospettiva centrale dell'oggetto rilevato. Per prospettiva centrale si intende la proiezione dei punti dell'oggetto su un piano di proiezione. A questo proposito, è possibile definire delle relazioni geometriche in base ai segmenti che congiungono i punti oggetto tridimensionali ai corrispondenti punti immagine bidimensionali. Tali punti convergono tutti in un punto "O" detto centro di proiezione che in termini semplificati è un punto dell'obbiettivo della camera.

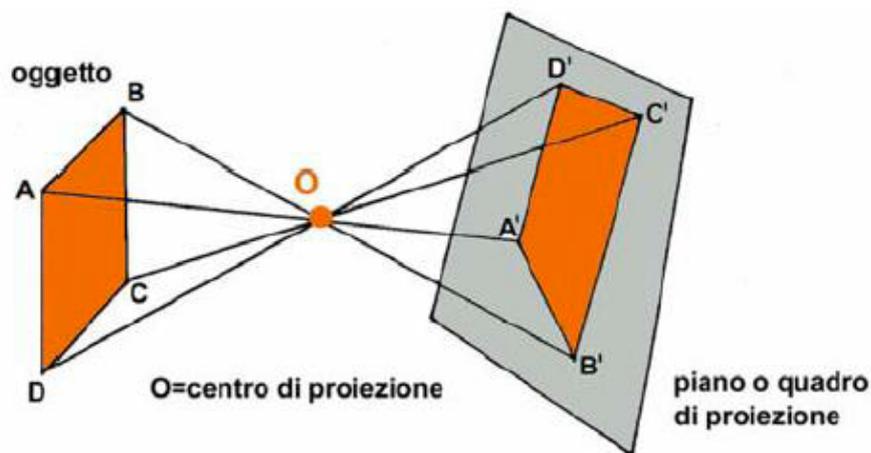


Figura 1.8. Rappresentazione della prospettiva centrale³⁵

Un solo fotogramma, però, non è sufficiente a riprodurre l'oggetto tridimensionale in quanto a ogni singolo punto, sulla fotografia, corrispondono infiniti punti dell'oggetto reale. È pertanto necessario disporre di minimo due o più fotogrammi, che da due differenti centri di presa, inquadrino il medesimo oggetto

³⁵ A. Spanò, Slide corso di Fotogrammetria, a.a. 2015-2016

- FONDAMENTI ANALITICI DELLA FOTOGRAMMETRIA

Tra i punti immagine e i corrispondenti punti oggetto intercorrono una serie di relazioni analitiche, che vengono definite tramite l'orientamento:

Orientamento interno: insieme di parametri che stabiliscono la geometria propria della camera da presa.

Orientamento esterno: insieme dei parametri utile alla determinazione dell'assetto spaziale della camera da presa in un sistema di riferimento prefissato, definito da 3 parametri che rappresentano le rotazioni e 3 che rappresentano le traslazioni.

A tal proposito, è quindi possibile determinare le relazioni analitiche, definite dall'equazioni di collinearità, che intercorrono tra le coordinate del punto oggetto e le rispettive coordinate del punto immagine in funzione del loro allineamento con il centro di proiezione.

$$\frac{X_p - X_1^0}{Z_p - Z_1^0} = \frac{a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}z'}{a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z'} \quad \frac{Y_p - Y_1^0}{Z_p - Z_1^0} = \frac{a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}z'}{a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z'} \quad (9)$$

$$\frac{X_p - X_2^0}{Z_p - Z_2^0} = \frac{b_{11}x'' + b_{12}y'' + b_{13}z''}{b_{31}x'' + b_{32}y'' + b_{33}z''} \quad \frac{Y_p - Y_2^0}{Z_p - Z_2^0} = \frac{b_{21}x'' + b_{22}y'' + b_{23}z''}{b_{31}x'' + b_{32}y'' + b_{33}z''}$$

Le (9) esprimono la condizione di collinearità fra un punto P del terreno e le sue due immagini P' e P'' sui fotogrammi di sinistra e di destra.

Le (9) esprime quindi il legame fra:

- le coordinate di un generico punto P nel sistema (X,Y,Z);
- i parametri che definiscono le posizioni delle teme O₁(x,y,z) e O₂(x,y,z) nel sistema (X,Y,Z); tali parametri sono le coordinate X₁⁰, Y₁⁰, Z₁⁰ e X₂⁰, Y₂⁰, Z₂⁰ delle origini delle teme O₁ e O₂ ed i loro valori angolari d'assetto (ω₁ φ₁ κ₁) e (ω₂ φ₂ κ₂) contenuti negli elementi a_{ij} e b_{ij} rispettivamente;
- le coordinate x',y' e x'',y'' dei punti P' e P'', immagini di P sui fotogrammi 1 e 2.

Figura1.9. Equazione di collinearità³⁶

³⁶ A. Spanò, Slide Corso di Fotogrammetria, a.a. 2015-2016.

- I CAMPI APPLICATIVI DELLA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria aerea: impiegata per il rilevamento del territorio e la produzione cartografica. Le prese avvengono tramite strumenti aerei, ad un'altezza superiore ai 500-1000 metri dal suolo. La fotogrammetria aerea è stata fondamentale per l'elaborazione e l'aggiornamento della Cartografia Nazionale a piccola scala, quella Tecnica Regionale e Urbana e infine la cartografia tematica. L'informazione data dai fotogrammi digitali raccolti, vengono gestiti e diffusi tramite gli strumenti GIS. È infatti oggi consuetudine, nella cartografia, elaborare e utilizzare Ortofotocarte, ovvero carte dal contenuto informativo fotografico, e i DTM, Digital Terrain Model che sono la rappresentazione digitale tridimensionale del terreno ottenuta dall'interpolazione delle curve di livello;

La fotogrammetria terrestre: impiegata per il rilevamento di manufatti architettonici o archeologici. Le prese avvengono da terra su oggetti a distanze ravvicinate. Le prese avvengono tramite l'impiego di strumenti video-fotografici utilizzabili manualmente dall'operatore o posizionabili su appositi supporti.

La fotogrammetria UAV (Unmanned Aerial Vehicle): le cui prese avvengono tramite droni³⁷ multicotteri o droni ad ala fissa da un'altezza massima di oltre 100 metri, che varia a seconda dello strumento utilizzato. È una tecnica innovativa che consente di acquisire immagini stereoscopiche, che integrate alla fotogrammetria terrestre, consentono di elaborare una documentazione 3D dei manufatti rilevati. “I recenti sviluppi nel

³⁷ I droni sono veicoli controllati da terra o dotati di pilota automatico. Essi sono impiegati maggiormente per la fotogrammetria aerea con lo scopo di rendere possibili rilievi di aree inaccessibili.

campo del rilievo UAV che consentono di acquisire oltre alle tradizionali immagini nadirali anche immagini oblique degli oggetti indagati”³⁸

Il volo di questi innovativi strumenti può essere effettuato manualmente o in modalità automatica. In entrambi i casi è indispensabile tener conto dell'informazione che si vuole ottenere dal rilievo, delle caratteristiche e dimensioni dell'area da rilevare e dalle condizioni meteorologiche e di luce durante la fase di volo. È opportuno, inoltre, posizionare uniformemente su tutta l'area target, precedentemente misurati con le tecniche topografiche GNSS, citate nel paragrafo precedente.



Figura 1.10. Esempio di drone esacottero



Figura 1.11. Esempio di drone ad ala fissa, modello eBee SenseFly

È opportuno, a questo riguardo, precisare che per ottenere un preciso rilievo fotogrammetrico, è prima indispensabile effettuare un “appoggio topografico”: esso consentirà un orientamento corretto dell'immagine grazie alla determinazione topografica di coordinate planometriche di determinati punti, collimabili sui fotogrammi.

³⁸ Antonia SPANÒ, Elisabetta DONADIO, Filiberto CHIABRANDO
“Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili” in Polymnia. Studi di Archeologia n.08 /2017.

Il procedimento, che si esegue durante un rilievo fotogrammetrico, si articola in tre fasi:

Fase di presa: operazione di acquisizione dei fotogrammi effettuata utilizzando opportune camere. In questa fase è opportuno effettuare prese da differenti angolazioni ovvero nadirali ed oblique. Questo permette di ottenere un modello tridimensionale finale di maggior dettaglio. Inoltre, durante l'acquisizione, è necessario mantenere la medesima distanza della messa a fuoco tra le varie acquisizioni per garantire una sovrapposizione minima del 80-90% dei fotogrammi. Ciò permette una buona più rapida e ottimale individuazione dei punti omologhi da parte dei software.

Fase di orientamento: operazione che ha lo scopo di determinare i parametri che definiscono le relazioni analitiche tra i punti oggetto e punti immagine. Esso si suddivide in orientamento interno, che determina i parametri che stabiliscono il sistema di riferimento dell'immagine e la posizione reciproca dei centri di proiezione e dei fotogrammi, e orientamento esterno utile alla determinazione dei centri di presa e dell'assetto spaziale dei fotogrammi nel sistema di riferimento dell'oggetto.

Fase di restituzione: operazione che permette la ricostruzione delle dimensioni e della forma dell'oggetto utilizzando specifici software. Con l'impiego della fotogrammetria è quindi possibile elaborare: nuvole di punti utili all'elaborazione tridimensionale di oggetti; ortofoto che rappresentano l'area rilevata da una veduta nadirale; DEM (Digital Elevation Model) modello digitale costituito da un'immagine raster contenente un valore altimetrico per ogni punto; DTM (Digital Terrain Model) che sono la rappresentazione tridimensionale del terreno in formato vettoriale e infine i DSM (Digital Surface Model) rappresentano anch'essi un'immagine con valori

altimetrici ma comprendono ogni oggetto presente sul suolo come alberi, vetture, edifici, ecc.

La fotogrammetria, si presenta particolarmente vantaggiosa, quindi, nel caso di rilievi a manufatti edilizi o archeologici in cui vi è l'impossibilità di potervi accedere per effettuare direttamente le misure. Si è resa quindi indispensabile, nelle operazioni di rilievo dell'oggetto di studio, in quanto la presenza di macerie e il rischio di crolli non permettevano agli operatori di rilevare direttamente il manufatto.

- GENERAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI

Per l'elaborazione di un modello tridimensionale, ottenuto da un dataset di fotogrammi, è necessario utilizzare software specializzati alla produzione e gestione di nuvole di punti.

Il primo step, inseguito all'inserimento dei fotogrammi all'interno del programma, è l'individuazione e il calcolo automatico, per mezzo di un algoritmo, dei punti omologhi identificati come tie-points. Questo procedimento si rivela "utile all'identificazione dei pixel simili da parte del software. Successivamente, ad ogni punto individuato è possibile aggiungere le coordinate spaziali acquisite durante le operazioni di rilievo topografico dei marker.

Attraverso un processo che mette in relazione i tie-points con la loro posizione nello spazio e il centro di presa del fotogramma, creerà una rete di intersezioni che darà origine ad un modello tridimensionale denso di punti.

Da questi modelli tridimensionali sono estraibili elaborati, grafici o numerici, utili ad analisi approfondite sull'oggetto rilevato come ad esempio l'estrapolazione di misure di dettaglio per la produzione di elaborati bidimensionali.

1.2.3. I SISTEMI A SCANSIONE LASER

Infine, ma non per importanza, vengono illustrati gli strumenti e i principi di misura dell'innovativa tecnica di rilievo mediante scansioni laser. I sistemi a scansione laser permettono di acquisire, in tempi brevissimi, la posizione di un elevato numero di punti. Essi costituiscono una nuova generazione di strumenti di misura, che vedono in un unico strumento l'integrazione di misure di distanza e direzioni, oltre che la possibilità di acquisire immagini coassiali rispetto al raggio laser. Questa tecnica di acquisizione è anche conosciuta con il nome LIDAR, ovvero Laser Imaging Detection and Ranging.

Questa tecnica è quindi costituita da un insieme di strumentazioni cablate in un apposito strumento di rilievo, ovvero:

un misuratore di distanza laser, che invia e riceve impulsi laser, fascio di radiazioni elettromagnetiche monocromatiche, con la stessa tecnologia impiegata da stazioni totali o distanziometri ovvero con la misurazione del tempo di volo dell'impulso oppure la differenza di fase tra l'onda emessa e l'onda riflessa;

uno specchio rotante, il quale permette di muovere il raggio laser in tutte le direzioni e ne misura l'assetto rispetto al sistema di riferimento strumentale;

una fotocamera digitale, che esegue una sequenza di fotogrammi nella stessa posizione di scansione;

Dall'impiego di questo strumento è quindi possibile ottenere un insieme di coordinate tridimensionali, all'interno di un sistema di riferimento collegato allo strumento, riferite ad un elevato numero di punti. Questi rappresentano il corrispettivo dei reali punti sull'oggetto, che vengono colpiti dal raggio laser emesso dallo strumento e indirizzato, mediante opportuni sistemi ottico/meccanici di rotazione,

variando gli angoli azimutali e zenitali con un certo passo angolare. Come risultato si ottiene, quindi, una nuvola di punti di coordinate note, che descrivono la superficie dell'oggetto, da cui sono facilmente estraibili, grazie a software dedicati, elaborati 2D quali piante, sezioni e prospetti o modelli tridimensionali. La tecnica LIDAR risulta, quindi, notevolmente vantaggiosa per la quantità di informazioni che vengono ottenute in tempi ridotti e per l'elaborazione automatica dei dati raccolti.

- LE TIPOLOGIE DI STRUMENTI A SCANSIONE LASER

Gli strumenti di misura a scansione laser si dividono in due categorie distinte:

Scanner Distanziometrici: strumenti che impiegano un principio di misura simile a quello utilizzato dalle stazioni totali. I punti vengono rilevati attraverso la misurazione diretta di due angoli e una distanza. La posizione tridimensionale del punto viene rilevata in coordinate sferiche, convertite in coordinate cartesiane calcolate in un sistema di riferimento collegato allo strumento. La misurazione della distanza viene quindi calcolata o misurando il tempo di volo dell'impulso oppure la differenza di fase tra l'onda emessa e quella riflessa. Gli strumenti che utilizzano quest'ultimo metodo di calcolo risultano più vantaggiosi poiché sono più precisi e hanno tempi di acquisizione piuttosto ridotti.

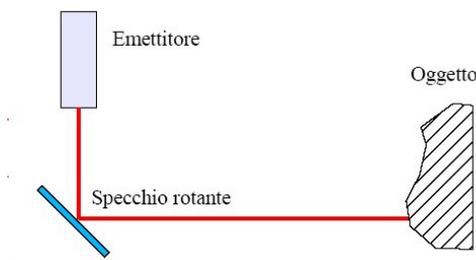


Figura 1.12. Funzionamento dei sistemi distanziometrici.³⁹

Scanner triangolatori: sono strumenti di misura che impiegano il medesimo principio della fotogrammetria vale a dire che il punto viene rilevato come intersezione di due rette di direzione nota nello spazio passanti per il punto stesso ma con origine da differenti scansioni. Tali strumenti possono essere o a camera singola, in cui un

³⁹ Marco Celotto "Laser scanner" (mat. 270966)
IUAV-Corso di Informatica e Disegno Digitale del Prof. Maurizio Galluzzo
<https://www.slideshare.net/MCelotto/laser-scanner>

trasmettitore invia il raggio laser che colpisce l'oggetto tramite uno specchio rotante, o a due camere, in cui il trasmettitore si trova in una posizione intermedia tra le due camere. Quest'ultimo sistema offre una precisione sub-millimetrica e quindi è adatto per rilievi a brevi distanze.

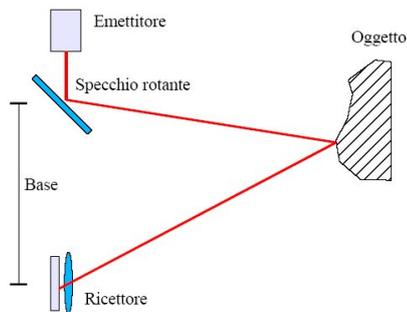


Figura 1.13. Funzionamento dei sistemi triangolatori⁴⁰

Un'ulteriore distinzione tra gli strumenti si ha anche in base alla metodologia di utilizzo:

Laser scanner fissi: gli strumenti vengono collocati su di un treppiede e posizionati su un punto fisso per tutta la durata della scansione;

Laser scanner mobili: gli strumenti vengono utilizzati manualmente dall'operatore che ha il compito di ruotare lo strumento attorno a tutta la superficie dell'oggetto da rilevare;



Figura 1.14. Esempio Laser scanner fisso, modello Focus 3D, Faro; Esempio Laser scanner mobile modello Freestyle, Faro⁴¹

⁴⁰ Ibidem

⁴¹<http://www.3dtarget.it/eu/it/laser-scanner/prodotti-laser-scanner/terrestri/demo-usati/faro-focus-3d-ms120-detail.html>
<https://surveyingpic.com/?11,faro-freestyle-handheld-3d-scanner>

- FASE DI RILEVAMENTO E ELABORAZIONE DATI

Per procedere alla fase di registrazione delle scansioni, è doveroso tener conto di diversi fattori da cui ne deriva una corretta acquisizione: la distanza dall'oggetto, l'errore di calcolo del tempo di volo, l'errore meccanico angolare, l'errore di calibrazione e infine l'errore di incidenza del raggio. Per ridurre l'errore è opportuno eseguire un notevole numero di scansioni, da diversi punti di vista che trovano al centro l'oggetto di rilievo, definendo la densità dei punti da rilevare. In sostanza, le numerose scansioni adiacenti devono avere un'alta superficie di sovrapposizione reciproca. Occorre inoltre tener conto delle caratteristiche dell'oggetto da rilevare, in quanto materiali trasparenti o particolarmente radio assorbenti riducono l'intensità del segnale ricevuto influenzando la scansione.

Come già precisato in precedenza, la misura della posizione dei punti avviene per coordinate sferiche rispetto al centro strumentale. La caratteristica di questa tecnica di rilievo, che la rende automatizzata rispetto all'utilizzo di strumentazioni topografiche, si trova nell'assenza, all'interno dello strumento laser, di un cannocchiale utile alla misurazione di punti prescelti dall'operatore. L'operatore, quindi, ha la sola possibilità di definire la direzione di acquisizione e la densità dei punti da rilevare, da cui ne consegue l'ampiezza del passo della scansione.

Dalla necessità di effettuare un gran numero di acquisizioni ne consegue l'ulteriore necessità di registrazione delle nuvole. Quest'operazione avviene mediante la tecnica di rototraslazione spaziale di una scansione in un altro sistema di riferimento. Con questo metodo si individuano almeno 3 oggetti di riferimento e si effettua matematicamente la trasformazione, ovvero la posizione esatta e l'orientamento della scansione. Vengono quindi assegnate

le coordinate nel sistema complessivo, non soltanto agli oggetti ma a tutti i punti. Il sistema di riferimento può essere definito da una scansione prescelta o per via topografica. Gli oggetti o riferimenti individuati possono essere: oggetti comuni come alberi, tubi, piuttosto che punti d'angolo o porzioni di piano oppure possono essere riferimenti posizionati manualmente, come ad esempio i target. Caratteristica fondamentale, di qualsiasi tipo di oggetto individuato, è che questo sia facilmente riconoscibile nella scena ritratta dalla scansione. Il metodo che utilizza i target richiede più tempo in quanto quest'ultimi, misurati per via topografica, sono meno riconoscibili in fase di elaborazione rispetto agli oggetti comuni. Il vantaggio, nell'utilizzo dei target, lo si evince dalla maggior precisione e dalla possibilità di georeferenziazione della nuvola.

Infine, è bene precisare che le scansioni adiacenti, con una sovrapposizione superiore del 30%, garantiscono un buon risultato finale e consentono anche un'ulteriore strategia di registrazione, in un unico sistema di riferimento, basato sulla semplice sovrapposizione delle nuvole.

2. IL CASO STUDIO DI SANT'AGOSTINO AD AMATRICE

2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Amatrice è un comune di circa 2800 abitanti, della provincia di Rieti nella regione Lazio. Situato nella Valle del Velino, il comune di Amatrice, si trova al confine tra le regioni Lazio, Abruzzo, Umbria e Marche. La sua posizione geografica risultò di grande rilevanza fin dall'antichità. Infatti, sorge lungo l'antica via Salaria, storico passaggio tra il versante adriatico e quello tirrenico.



Figura 2.1. Inquadramento territoriale regione Lazio⁴², Provincia di Rieti, Amatrice.⁴³

Dal punto di vista orografico, il territorio, incastonato nell'alto bacino idrografico del fiume Tronto, si estende su un altopiano centrale con un'altitudine compresa tra i 900 e i 1000 metri. Quest'ultimo si trova circondato dai Monti della Laga, rilievi situati sul versante orientale che superano i 2400 metri.

⁴² Immagine di sfondo: <http://www.piuscuola.it/2018/08/cartina-muta-fisica-e-politica-dellitalia-online-da-stampare/>
http://www.webalice.it/renza.proch/ITALIA_1/regione_lazio.htm

⁴³ https://d-maps.com/carte.php?num_car=207558&lang=it

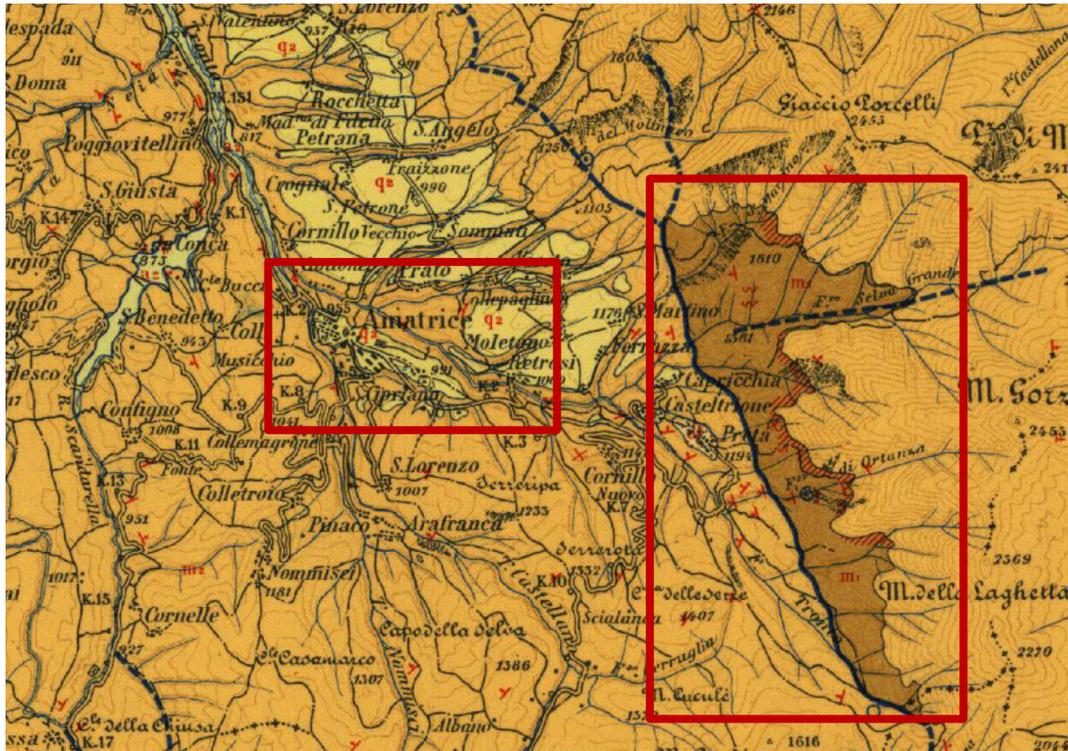


Figura 2.2. Stralcio Carta Geologica d'Italia, in scala 1: 100.000, foglio 139, con la localizzazione di Amatrice e Monti della Laga.⁴⁴

Il gruppo montuoso si sviluppa per oltre 24 km tra gli altopiani di Amatrice, di Composto e il Subappennino Teramano. Si elevano per un settore di quasi 12 km oltre i 2000 metri s.l.m. A tal proposito, i Monti della Lega "costituiscono il più alto rilievo arenaceo dell'Appennino".⁴⁵ La conca di Amatrice, nel 1992, entrò a far parte del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga, "divenuto operante nel 1996, è stato istituito nel 1991, con l'emanazione della Legge Quadro sulle aree protette (L. n. 6 dicembre 1991, n. 394), per

⁴⁴ http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/tavoletta.php?foglio=139

⁴⁵ Daniel Badino, "studio per un progetto di Human dimension nel comune di amatrice: pianificazione e realizzazione di un'indagine conoscitiva", 2007. <http://www.gransassolagapark.it/Pdf/progetti/PNGSLprogetti107-2.pdf>

preservare e valorizzare le risorse naturali e storico-culturali presenti nel suo vasto e complesso territorio."⁴⁶

Il tessuto urbano, del comune di Amatrice, si presenta disarticolato. Esteso per una superficie di circa 174,4 km², il Comune, oltre al centro principale, è suddiviso in 34 frazioni territorialmente poco estese.

Il centro storico, del comune di Amatrice, si mostra compatto con una struttura a scacchiera irregolare e articolato lungo gli assi di comunicazione di Via Umberto I e Via Roma. All'estremità sud-orientale del centro storico, troviamo collocata la chiesa di Sant'Agostino, oggetto di analisi in questo lavoro di tesi.

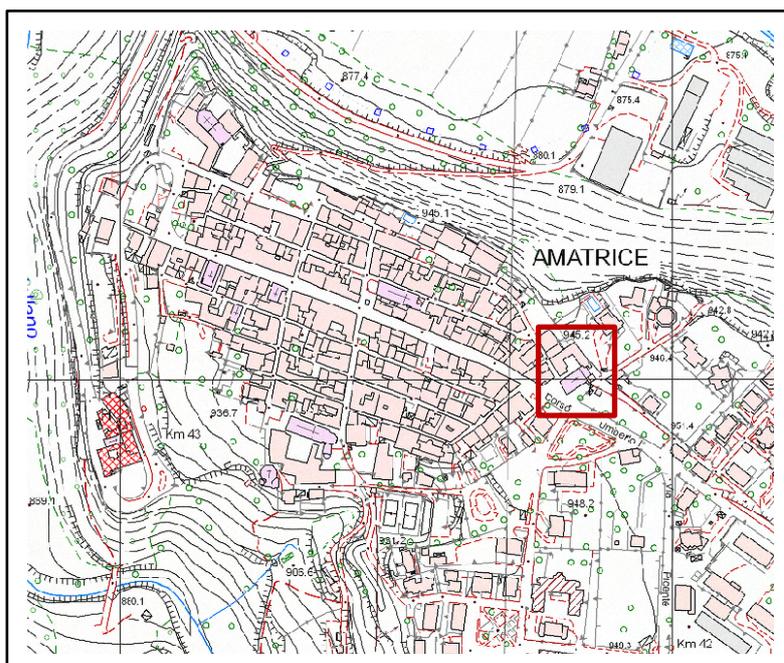


Figura 2.3. Stralcio Carta Tecnica Regionale 1:5000⁴⁷, con la localizzazione della Chiesa di Sant'Agostino.

⁴⁶ <http://www.gransassolagapark.it/pagina.php?id=18>

⁴⁷ Geoportale Regione Lazio <http://cartografia.regione.lazio.it/cartanet/>

2.2. CENNI STORICI

2.2.1. RIFERIMENTI CRONOLOGICI DI AMATRICE

Le origini di Amatrice risalgono all'epoca medioevale. Gli scavi archeologici, condotti fino ad oggi, non hanno dato rilevanti risultati riguardanti un insediamento urbano più antico, ma ciò è ipotizzabile data la sua strategica posizione. Infatti, la conca di Amatrice, si snoda lungo il tracciato della via Salaria, storico collegamento tra Roma e l'Adriatico, di grande importanza economico-sociale fin dai primi insediamenti arcaici.

Tuttavia, grazie ai documenti pervenuti ad oggi, sappiamo che, con la conquista romana, la conca di Amatrice prese il nome di Summa Villarum. Ciò è conformabile, come scrive lo storico Anton Ludovico Antinori nel XVIII secolo, anche dal fatto che la frazione più alta della località prende oggi il nome di Sommati. Egli precisa infatti che "Geograficamente questa villa è così detta perché situata in luogo più alto, quasi una Summa Villarum [...] Si direbbe in italiano villa posta alla sommità delle altre".⁴⁸

Sulle origini del nome di Amatrice, invece, non ci sono documenti certi. Si ipotizza che esso derivi dal latino Mater Truntis ovvero Madre del Tronto, fiume che bagna il territorio sul lato occidentale. In epoca romana, come trasmesso dal Regesto di Farfa, tutto l'insediamento urbano situato sulla sponda sinistra del fiume Tronto, prese il nome di Matrice. Ciò è ulteriormente

⁴⁸ ANTON LUDOVICO ANTINORI, *Corografia storica degli Abruzzi e de' luoghi circonvicini*, Il voll., Deputazione abruzzese di storia patria, L'Aquila sd

confermato da un documento, risalente al 1037, redatto dall'imperatore Corrado II in cui venivano citati tutti i suoi possedimenti.⁴⁹

Nel 1265, il territorio di Amatrice, entra a far parte del regno delle due Sicilie, che all'epoca era in mano a re Manfredi di Svevia. Fedele alleata agli Svevi, durante la lotta di successione tra Svevi e Angioini, si ribellò tra 1271 e il 1274 quando il dominio passò nelle mani della corona francese. Infatti, testimonianze ci trasmettono che Carlo D'Angiò inviò degli eserciti per reprimere la resistenza della popolazione amatriciana.

La sua vera e propria identità, Amatrice, la prese proprio in quell'epoca quando, alla scomparsa dei baroni, si formò la "Universitas" con a capo Amatrice. Si trattava di un "comune" in un territorio liberamente organizzato e autonomo dal potere centrale.

Durante il XIV e XV secolo Amatrice, alleata con la città di Ascoli Piceno, si trovò in un lungo conflitto con i territori circostanti per questioni di confini e prestigio. Tra le battaglie più note, si citano quelle con Norcia, Arquata e l'Aquila.

Nel 1582, dopo aver preso parte ai conflitti tra angioini e aragonesi al fianco di quest'ultimi, Amatrice passò sotto il dominio dei Medici di Firenze fino al 1737.

⁴⁹ Romeo Giammarini, "L'IMPIANTO URBANO DELLA CITTÀ DI AMATRICE. GEOMETRIE, ADATTAMENTI E TRASFORMAZIONI SECC. XIII-XV" articolo contenuto nella rivista "CENTRI DI FONDAZIONE E INSEDIAMENTI URBANI NEL LAZIO (XIII-XX SECOLO): DA AMATRICE A COLLEFERRO" edizione Kappa, Settembre 2017. La rivista è consultabile in versione PDF open access all'indirizzo: <http://www.storiadellacitta.it/category/biblioteca/riviste/>



Figura 2.4. Anonimo del '500, dipinto del 1556 custodito nella chiesa del SS. Crocifisso rappresentante le mura di Amatrice.

Nel 1860, infine, il territorio di Amatrice fu ufficialmente annesso al Regno d'Italia e fu inserita nell'Abruzzo Aquilano. Successivamente, con la creazione della provincia di Rieti, nel 1927 Amatrice entrò a far parte ufficialmente della regione Lazio.



Figura 2.5. E. Lear: Lear's Illustrated Excursions in Italy, Thomas M'Lean, London, 1846, veduta di Amatrice da occidente.

Il 4 Dicembre 1992, con il Decreto Ministeriale, fu istituito e definito per la prima volta il perimetro del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga. Tra i parchi più estesi d'Italia, 148.935 ettari, esso comprende al suo interno tre gruppi montuosi coinvolgendo tre regioni, cinque province, quaranta-quattro comuni tra cui quello di Amatrice.⁵⁰

⁵⁰ Informazioni tratte dal sito ufficiale "Parco Nazionale del gran sasso e monti della laga" <http://www.gransassolagapar.it>



Figura 2.6. Percorso turistico “Parco in Miniatura”. A sinistra porta carbonara e il campanile della chiesa di Sant’Agostino⁵¹

Nel 2015, Amatrice entra a far parte dei “Borghi più belli d’Italia” soprattutto grazie al suo patrimonio enogastronomico e alle cento chiese presenti su tutto il territorio.



Figura 2.7. Vedute aeree della conca di Amatrice (RI) prima del terremoto.⁵²

I documenti raccolti, sui riferimenti storici che hanno costituito il comune di Amatrice, raccontano anche di un’importante sismicità storica. Infatti, la conca di Amatrice, “ha come caratteristica principale la presenza di un cluster di quattro terremoti storici, verificatisi rispettivamente nel luglio 1627, il 7 ottobre 1639, terremoto

⁵¹ Il Parco in Maniatura esprime la finalità di offrire al visitatore, attraverso un sistema integrato di elementi identificativi, una rappresentazione evocativa del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga.
<https://www.comune.amatrice.rieti.it/parco-in-miniatura/>

⁵² <http://lettera13.blogspot.com/2016/08/il-cuore-ditalia.html>

che devastò il centro urbano di Amatrice e diverse località circostanti, infine nel 1646."⁵³

Un territorio, quindi, storicamente caratterizzato da numerosi terremoti di forte intensità fino alla più recente serie di eventi sismici, registrati tra l'Agosto del 2016 e Dicembre 2017, che hanno completamente devastato e raso al suolo il borgo e gran parte del territorio circostante.



Figura 2.8. Vedute aeree della conca di Amatrice (RI) prima e dopo il terremoto dell'Agosto 2016.⁵⁴

⁵³ Tratto da Gruppo di Lavoro INGV sul terremoto in centro Italia (2016). Rapporto di sintesi sul Terremoto in centro Italia Mw 6.5 del 30 ottobre 2016, doi: 10.5281/zenodo.166019

⁵⁴https://www.corriere.it/foto-gallery/cronache/16_agosto_24/terremoto-amatrice-immagini-strade-prima-il-sisma-a6fabf2e-69e2-11e6-a553-980eec993d0e.shtml

2.2.2. RIFERIMENTI CRONOLOGICI DELLA CHIESA DI SANT'AGOSTINO

Il comune di Amatrice prima dell'800 contava numerosissime chiese. Un lavoro di ricerca, a cura dell'Architetto Giulio Annibali, ipotizza un progetto di ricostruzione delle mura e delle porte della città alla fine dell'800⁵⁵, che portò alla trasformazione o perfino alla demolizione di alcune di esse per far spazio al nuovo assetto della viabilità urbana. Come già precisato nel paragrafo precedente, Amatrice è sempre stata fin dalle sue origini una città di transito data la sua posizione geografica sullo snodo della via Salaria. Si contano infatti sei ingressi, le cosiddette porte, da cui potervi accedere. Tra queste sei, è di particolare rilevanza citare, in merito a questo lavoro di tesi, Porta Carbonara situata nell'angolo sud-est di Amatrice.



Figura 2.9. Distribuzione delle porte, delle chiese e degli edifici più antichi tutti concentrati a occidente della via Roma.⁵⁶ All'interno del riquadro rosso viene mostrata la posizione di Porta Carbonara.

⁵⁵ Giovanni Alegiani "Giulio Annibali. Le mura e le porte di Amatrice", Novembre 2017.

<http://www.collegentileco.it/2017/11/15/le-mura-e-le-porte-di-amatrice/>.

⁵⁶ Romeo Giammarini "L'IMPIANTO URBANO DELLA CITTÀ DI AMATRICE" Editoriale "STORIA DELL'URBANISTICA" Fondato da Enrico Guidoni nel 1981, - Serie Terza 9/2017, Edizione Kappa.

Da qui vi transitava chi proveniva dalle frazioni verso est e verso i monti della Laga. Tale ingresso è di particolare importanza poiché si trova adiacente all'oggetto di studio analizzato ovvero, come già citato nei capitoli precedenti, la chiesa di Sant'Agostino. Si ipotizza, che, accanto alle antiche mura difensive della città e a Porta Carbonara, "ci fosse già una chiesa intorno al 1287 di cui si osserva traccia, dell'antico impianto, sulla parte inferiore del fianco Nord-Ovest, più spoglio e irregolare rispetto agli altri fianchi liberi"⁵⁷. La struttura architettonica, a noi oggi nota, fu commissionata dai monaci Agostiniani all'architetto Giovanni dell'Amatrice nel 1428. Venne quindi costruita a ridosso della già esistente porta d'ingresso, ultimo frammento delle antiche mura della città preservate fino al terremoto del 2016. Originariamente, la chiesa, fu dedicata a San Nicola di Bari in seguito, nella prima metà del XV secolo, fu dedicata a Sant'Agostino.

Architettonicamente la chiesa a unica navata di Sant'Agostino, "riferibile agli stilemi delle 'chiese-fienile' del gotico mendicante tosco-umbro"⁵⁸, è composta da una facciata in pietra arenaria, tipica della zona, a terminazione orizzontale in cui è inserito un portale in marmo con motivi decorativi tardo gotici e un tetto a falde con orditura a vista. In corrispondenza della storica Porta Carbonara, sul lato destro della chiesa si erge l'alto e esile campanile rettangolare, originariamente realizzato come torre difensiva⁵⁹ e in un secondo tempo adattato a campanile, e su ciascun lato della

⁵⁷ Carbonara G. "1982 Gli insediamenti degli Ordini Mendicanti in Sabina, Lo spazio dell'umiltà", Atti del convegno di studi sull' edilizia dell'Ordine dei minori, Fara Sabina, 3-6 Novembre 1982, Centro francescano Santa Maria in Castello, Fara Sabina.

⁵⁸ Ibidem

⁵⁹ Ibidem

struttura sono presenti un paio di finestre oblunghe con archetti e lesene lanceolate rinforzate.



Figura 2.10. E. Lear's *Illustrated Excursions in Italy*, la chiesa di S. Agostino e la porta Carbonara.

Nel 1580 e successivamente nel 1781 la chiesa fu danneggiata da un incendio, in particolare fu colpita l'antica abside che fu poi parzialmente ricostruito. Nel 1703, invece, un terremoto danneggiò gravemente la facciata principale. Questo evento portò, durante i lavori di ristrutturazione, all'aggiunta una grande finestra rettangolare.

A metà del XIX secolo la volta fu completamente ricostruita e anche il campanile subì dei restauri di consolidamento. Tra il 1933 e il 1935, durante il fascismo, la facciata principale fu parzialmente alterata. Questa fu, aumentata di quattro metri e venne aggiunto un rosone al posto della grande finestra rettangolare del XVIII secolo.



Figura 2.11. Prospetto principale chiesa di Sant'Agostino prima e dopo l'aggiunta del rosone durante il fascismo⁶⁰

⁶⁰ Immagine reperite con i documenti della Soprintendenza.

Nel 1979, la chiesa subì nuovamente danni a tutte le strutture murarie, senza alcun crollo, a causa del terremoto della Valnerina di magnitudo 5,8. In particolare, a seguito di quell'evento sismico, furono rilevati i seguenti danni: "a potential detachment of the facade; disconnections throughout the upper perimeter of the walls in correspondence with the supports of the trusses; damage to the lintels of the windows. Moreover, the roof was in precarious stability due to the movements that the wooden beams suffered during the event."⁶¹ L'anno seguente, furono quindi eseguiti dei lavori di consolidamento in tutta la struttura, compreso il rifacimento del tetto in legno "always in trusses, resting on a perimeter curb in reinforced concrete, and seaming of the wall lesions by reinforced injections, as the technical building code of that period required."⁶²

Nel 2016, la chiesa di Sant'Agostino è stata nuovamente coinvolta in una serie di terremoti, che hanno colpito le regioni dell'Italia centrale. Durante questi eventi catastrofici gran parte della chiesa è andata distrutta, compreso l'intero tetto, la parete sul lato Nord-Ovest e il campanile. Permangono ancora oggi, parzialmente preservati, la facciata principale della chiesa, in cui è inserito il portale, e la parete sul lato Sud-Est.



Figura 2.12. Immagini del prima e dopo il terremoto. Immagini acquisite durante le campagne di rilievo di settembre, febbraio dalla Task Force del Politecnico di Torino, Diocesi di Rieti e Vigili del Fuoco.

⁶¹ A. Grazzini, F. Chiabrandò, S. Foti, A. M. Lingua, A. T. Spanò "DAMAGE ASSESSMENT AND SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE", Giugno 2018.

⁶² ibidem

2.3. IL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA

Il 24 Agosto del 2016, alle 3.36 della mattina, una scossa di terremoto con una magnitudo di 6.1 colpì l'area dell'Italia centrale. L'epicentro del sisma fu registrato ad Accumoli, in provincia di Rieti, nella regione Lazio. E fu proprio Accumoli e nella vicina Amatrice che si registrarono i danni più gravi con crolli diffusi.

L'evento sismico, secondo geologi esperti, fu causato dallo scorrimento di una faglia distensiva situata ai piedi dei Monti della Laga, i quali si sviluppano per oltre 24 km tra gli altopiani di Amatrice e di Campotosto. Questa lunga frattura "si sviluppa per alcune decine di chilometri e che nel tempo si è mossa per circa 2000 metri."⁶³

Sempre secondo geologi esperti, la formazione di questa faglia, che risale a circa 2 o 3 milioni di anni fa, è dovuta "ai movimenti cui sono stati sottoposti gli Appennini nel loro insieme e in particolare in seguito all'innalzamento del gruppo del Gran Sasso più a sud".⁶⁴

Per molto tempo, questa frattura non ha dato origine ha eventi sismici di notevole intensità, ma era ben nota da tempo la sismicità storica dell'area. Documenti storici, infatti riportano, nella stessa zona, terremoti disastrosi nel "1639 con una Magnitudo di 6.2, nel 1646 con una Magnitudo 5.9 e nel 1703 con Magnitudo 6.9"⁶⁵.

⁶³ "Luigi Bignami "il terremoto in centro italia, le cause." Focus, 2016 <https://www.focus.it/scienza/scienze/terremoto-rieti-peugia-centro-italia>

⁶⁴ Ibidem

⁶⁵https://ingyterremoti.files.wordpress.com/2016/09/relazione_di_dettaglio_rieti_mw_6-0_del_2016-08-24_01_36_32_utc_versione_del_2016-08-24_ore_04_26_02_utc-1.pdf

La notte del 24 agosto fu solo l'inizio di uno sciame sismico che persiste tutt'oggi. Dopo nemmeno un mese e mezzo dal primo evento catastrofico, il 26 e il 30 Ottobre del 2016, furono nuovamente registrati altri due grandi eventi sismici rispettivamente di Magnitudo 5.9 e 6.5. Il patrimonio edilizio già ampiamente danneggiato fu polverizzato. Secondo INGV, Centro Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,⁶⁶ il terremoto del 30 ottobre con epicentro a Norcia, è stato il sisma più forte registrato in Italia dal 1980, anno in cui un violento terremoto rase al suolo L'Irpinia.⁶⁷

Infine, il 18 Gennaio del 2017, la terra ritorna a tremare con una serie di quattro scosse nell'arco di quattro ore. L'intensità registrata fu minore dei precedenti eventi, ma si registrarono ulteriori gravissimi crolli al patrimonio edilizio che si cercava di preservare.

Dal 24 Agosto 2016 sono state dispiegate tutte le risorse disponibili, umane e materiali, per gestire l'emergenza. Nei comuni colpiti dal sisma, il patrimonio edilizio e culturale, polverizzato, ad oggi si presenta sotto forma di cumulo di macerie avvolto da un silenzio spettrale. Secondo i dati Istat, il sisma ha raggiunto ben 140 comuni differenti recando danni a ben 293 beni, di rilevanza culturale, che sono stati in parte distrutti o gravemente danneggiati.⁶⁸

A partire dal primo terremoto il complesso religioso, tardo medievale, di Sant'Agostino, è stato rilevato dopo ogni evento sismico, con l'impiego di strumentazioni innovative, dal Politecnico di

⁶⁶ L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è stato costituito con Decreto legislativo 29 settembre 1999, n. 381, dalla fusione di cinque istituti già operanti nell'ambito delle discipline geofisiche e vulcanologiche.

⁶⁷ Gruppo di Lavoro INGV sul terremoto in centro Italia (2016). Rapporto di sintesi sul Terremoto in centro Italia Mw 6.5 del 30 ottobre 2016, doi: 10.5281/zenodo.166019

⁶⁸ Dati ISTAT raccolti online sul sito <https://www.istat.it/it/archivio/rischio+sismico>

Torino in coordinamento con le istituzioni nazionali e dal gruppo di ricerca geomatica Team Disaster Recovery. A tal proposito, nasce l'idea di svolgere questo lavoro di tesi, al fine di illustrare i risultati ottenuti fino ad oggi, mostrando una prospettiva multi-temporale riguardante la rappresentazione grafica di lesioni, dissesti e crolli individuati analizzando i tre diversi tempi in cui il manufatto è stato colpito dagli eventi sismici.

3. ANALISI DEL CASO STUDIO

3.1. LE CAMPAGNE DI RILIEVO

Successivamente a ciascun evento sismico, il gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino in collaborazione con il team RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) dei Vigili del Fuoco italiani, hanno eseguito tre campagne di rilievo sul manufatto ecclesiastico di Sant'Agostino.⁶⁹ I rilievi, i dati acquisiti e le elaborazioni prodotte, per ogni campagna di misurazione, sono state identificate con l'acronimo temporale: T1 (Rilievo Settembre 2016), T2 (Rilievo Dicembre 2016) e T3 (Rilievo Febbraio 2017). Come si può vedere dallo schema riportato (Fig. 3.1), sono state riassunte, per ciascuna campagna di rilievo, le principali operazioni e strumentazioni di acquisizione utilizzate per l'acquisizione dei dati.

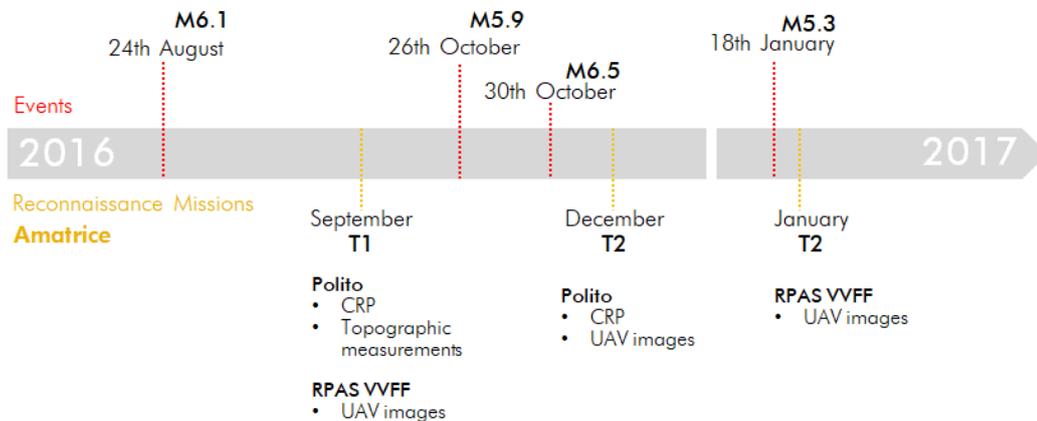


Figura 3.1. Le campagne di rilievo multi-temporali post sisma.⁷⁰

⁶⁹ A. Grazzini, F. Chiabrando, S. Foti, A. M. Lingua, A. T. Spanò "DAMAGE ASSESSMENT AND SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE", Giugno 2018.

⁷⁰ G. Sammartano "Doctoral Dissertation in Suitability Of 3D Dense Models for Rapid Mapping Strategies on Cultural Heritage Documentation And Conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions.", Febbraio 2018.

Durante la prima fase di acquisizione, avvenuta tra il 5 e il 9 Settembre 2016, sono state impiegate le prime operazioni di rilievo fotogrammetrico terrestre e topografico sul fabbricato. L'area, in cui vi era sito l'oggetto di studio, era identificata come zona rossa pertanto le operazioni di acquisizione dei dati sono state rapide e parziali. I fotogrammi terrestri sono stati acquisiti utilizzando una fotocamera digitale reflex Nikon D800E, dotata di un sensore 24x36mm. Le immagini, di dimensione 7360 x 4912 pixel, sono state scattate da circa 8 m di distanza dalla chiesa, e calibrate per bilanciare luce e colori per nascondere eventuali differenze durante l'elaborazione delle fasi successive.⁷¹ A causa della pericolosità del sito, durante queste prime operazioni di rilievo fotogrammetrico, non è stato possibile accedere ad alcune aree della chiesa e quindi è stato possibile acquisire solo i fotogrammi della facciata principale, del prospetto Est e del Campanile.

A supporto delle acquisizioni fotogrammetriche, inoltre, durante il primo rilievo sono stati acquisiti 16 punti di controllo naturali da terra, utilizzando una stazione totale, in un sistema di riferimento locale. Tali punti, quindi, sono stati acquisiti direttamente sulle due facciate visibilmente accessibili della chiesa, in quanto le problematiche strutturali non permettevano l'affissione di target a scacchiera.

Questo dataset topografico, a causa della pericolosità del sito, è stato acquisito solo durante la prima campagna di rilevamento. Pertanto, i dati topografici raccolti, sono stati impiegati per le tutte le elaborazioni di documentazione dei dati

⁷¹ F. Chiabrando, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè "MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESSMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)"

fotogrammetrici aerei e terrestri, dell'intero progetto sulla chiesa di Sant'Agostino.

Successivamente alle operazioni di rilievo topografico e fotogrammetrico terrestre, sono stati eseguiti rilievi fotogrammetrici UAV, integrati con appoggio topografico GNSS-RTK, grazie alla collaborazione del gruppo RPAS dei Vigili del fuoco. La prima raccolta dati UAV è stata prodotta con il drone INSPIRE 1⁷², prodotto dalla società DJI (Dà-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd Technologies). I voli sono stati effettuati in modalità manuale in modo da regolare al meglio l'esposizione della messa a fuoco dei fotogrammi. In totale sono state acquisite circa 600 immagini UAV, nadirali e oblique, che coprono l'intero complesso architettonico.⁷³ Dai risultati ottenuti, l'elevazione media raggiunta durante i voli è stata impostata a circa 40 m sopra il terreno.



Figura 3.2. Operazioni di rilievo topografico mediante stazione totale e operazioni di rilievo fotogrammetrico UAV, gruppo RPAS dei vigili del fuoco con INSPIRE 1.

Il Politecnico di Torino, in collaborazione con il GEER Team e RPAS dei Vigili del fuoco, tra il 29 Novembre e il 4 Dicembre organizza una seconda campagna di rilievo. In questa sessione, sono state

⁷² Drone dotato di fotocamera Zenmus X5 (lunghezza focale di 15 mm F / 1.7-F / 16 e un campo visivo (FOV) di 72 °) in grado di acquisire anche video 4K e 16 MP (4608x3456). <https://www.dji.com/inspire-1/camera#x5>

⁷³ F. Chiabrando, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè "MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)"

acquisite ulteriori immagini terrestri, con la medesima fotocamera digitale, del manufatto nuovamente danneggiato dal secondo evento sismico. Il rilievo fotogrammetrico aereo, invece, è stato realizzato con il drone Phantom 4⁷⁴, della stessa società produttrice, “realizzando voli in modalità manuale in base alla forma della chiesa al fine di acquisire un numero sufficiente di immagini per una corretta realizzazione di una documentazione completa dell'area per scopi fotogrammetrici.”⁷⁵

Infine, successivamente alla sequenza dei 3 terremoti avvenuti Gennaio 2017, il 19 Gennaio 2017 il gruppo RPAS dei Vigili del fuoco ha nuovamente eseguito un dataset di immagini UAV utilizzando nuovamente il drone INSPIRE 1, con la stessa modalità manuale applicata nei rilievi precedenti.

⁷⁴ Drone dotato di videocamera 4K con sensore CMOS da 1 / 2,3", campo visivo a 94 gradi, immagini da 12,4 MP, <http://www.djitop.com/it/store/dji-phantom-4-detail>

⁷⁵ Chiabrandò, A. Di Lollo, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè “MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESSMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)”

3.2. ELABORAZIONI DEI DATI DEI RILIEVI

3.2.1. ELABORAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI

L'elaborazione dei risultati ottenuti, durante la fase di rilievo, sono il cuore di una ricerca che sta conducendo il gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, sull'analisi del ruolo della disciplina nell'ambito delle emergenze.

I dati, acquisiti durante le 3 fasi rilievo, sono stati elaborati utilizzando software specifici, per la realizzazione di modelli tridimensionali. Questi, raffiguranti le tre fasi di crollo della chiesa di Sant'Agostino, sono risultati fondamentali poiché hanno permesso di estrapolare i contenuti significativi del lavoro svolto in questa tesi.

I tre dataset fotogrammetrici sono stati elaborati utilizzando il software Photoscan Pro di Agisoft⁷⁶, potente programma utile alla realizzazione di modelli tridimensionali partendo da un set di immagini bidimensionali. Il programma elabora una nuvola di punti utilizzando il metodo di orientamento fotogrammetrico tramite l'inserimento di marker, ovvero il riconoscimento di punti omologhi nei vari fotogrammi grazie alla sovrapposizione programmata durante la fase di rilievo. La georeferenziazione delle nuvole è stata eseguita inserendo i punti misurati con le tecniche topografiche durante il rilievo T1.⁷⁷ Per la modellazione 3D della nuvola, invece, sono stati impiegati i software 3DReshaper di Technodigit-Hexagon e Cloud Compare⁷⁸ open source.

⁷⁶<http://www.agisoft.com>

⁷⁷A. Grazzini, F. Chiabrando, S. Foti, A. M. Lingua, A. T. Spanò "DAMAGE ASSESSMENT AND SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE", Giugno 2018.

⁷⁸ <http://www.3dreshaper.com> e <http://www.danielgm.net/cc>

Questi step hanno quindi permesso di produrre modelli tridimensionali, altamente dettagliati, della chiesa, che rappresentano le tre fasi di crollo:



Figura 3.3. Nuvola Densa T1 - Settembre 2016



Figura 3.4. Nuvola Densa T2 - Dicembre 2016



Figura 3.5. Nuvola densa T3 - Febbraio 2017

Questa fase di processamento dei dati mirava principalmente alla realizzazione di modelli tridimensionali “dettagliati ad alta risoluzione per la documentazione, visualizzazione, mappatura e misurazione dei danni riportati dalla struttura.”⁷⁹

⁷⁹ Chiabrandò, A. Di Lollì, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè “MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)”

3.2.2. ESTRAZIONE DELLE ORTOFOTO

Successivamente alla creazione delle nuvole di punti e alle relative mesh di quest'ultime, è stato possibile estrarre una serie di ortofoto utili ad un'analisi accurata dei danni riportati sulle quattro facciate della chiesa. Questo processo è stato effettuato sempre utilizzando il software Agisoft Photoscan.

Per l'estrapolazione delle ortofoto, il primo step ha riguardato la pulizia della mesh da possibili elementi di disturbo quali edifici limitrofi, alberi o macerie. Per l'inserimento dell'ortofoto in un corretto sistema di riferimento, è necessario individuare il piano del fronte, sul quale l'ortofoto sarà calcolata, utilizzando un numero minimo di 3 punti noti. Pertanto, il passaggio successivo è stato proprio quello di individuare i tre punti noti, su ogni faccia interessata del modello. Dal momento che non in tutte le facce erano presenti punti di controllo, è stato necessario crearne di nuovi inserendo, per ognuno, le coordinate individuate sulla mesh, con l'ausilio del software 3DReshaper.

Infine, è stato possibile generare l'ortofoto indicando, al software, di realizzare un Ortofotomosaico utilizzando come punti di riferimento i marker individuati con le coordinate note.



Figura 3.6. Ortofoto T1, Settembre 2016: Facciata principale Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice

Per rimuovere tutti quegli elementi prospettici o superflui, contenuti nell'immagine, è stato necessario attuare dei fotoritocchi alle ortofoto ottenute utilizzando il software Adobe Photoshop CC 2015.

Seguiti questi passaggi, è stato quindi possibile produrre ortofoto, dettagliate, delle due facciate laterali di quella principale e quella posteriore della chiesa, utili alla successiva produzione di elaborati 2D in formato vettoriale. Infatti, l'accuratezza dei risultati ottenuti, consente di produrre elaborati adatti ad una rappresentazione in scala 1:100.

Di seguito viene illustrato l'esempio prodotto dell'ortofoto della facciata principale, in seguito al primo terremoto.



Figura 3.7. Ortofoto T1, Settembre 2016: Facciata principale Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice ritagliata

3.3. DOCUMENTAZIONE D'ARCHIVIO

A supporto delle elaborazioni prodotte, a seguito delle acquisizioni ottenute durante i rilievi, è stata reperita, dalla Soprintendenza, la documentazione relativa a rilievi dello stato di fatto della Chiesa di Sant'Agostino risalenti al 1980.

Questi disegni si sono rilevati, fin da subito, molto importanti in quanto hanno permesso di essere confrontati con i recenti rilievi, per verificare le volumetrie dell'oggetto di studio. È stato inoltre possibile individuare delle lesioni risalenti al 1980 confrontabili con i danni subiti in seguito al recente terremoto. La documentazione raccolta raffigura, quindi, disegni tecnici elaborati in seguito a rilievi diretti effettuati da esperti.

Le fonti raccolte sono giunte fotografate, quindi il primo passaggio essenziale effettuato si è basato sull'organizzazione del materiale. I documenti sono stati necessariamente sottoposti ad un lavoro di fotoritocco, con opportuni software, che hanno permesso di ottenere immagini raddrizzate in scala, confrontabili con i dati ottenuti dai recenti rilievi.

Con questi programmi è, quindi, possibile impiegare un metodo di calcolo, in grado di annullare l'effetto prospettico della fotografia (creazione di un fotopiano). Esso quindi permette di ottenere immagini in scala e metricamente precise, su cui è possibile effettuare misure lineari. Per effettuare questa procedura è stato utilizzato il software RDF⁸⁰, per ogni singola immagine, applicando quando opportuno o il metodo analitico, che produce immagini

⁸⁰ RDF è un programma che consente di effettuare il raddrizzamento di immagini per il rilievo da fotografie digitali o tradizionali sia con metodo analitico che geometrico.

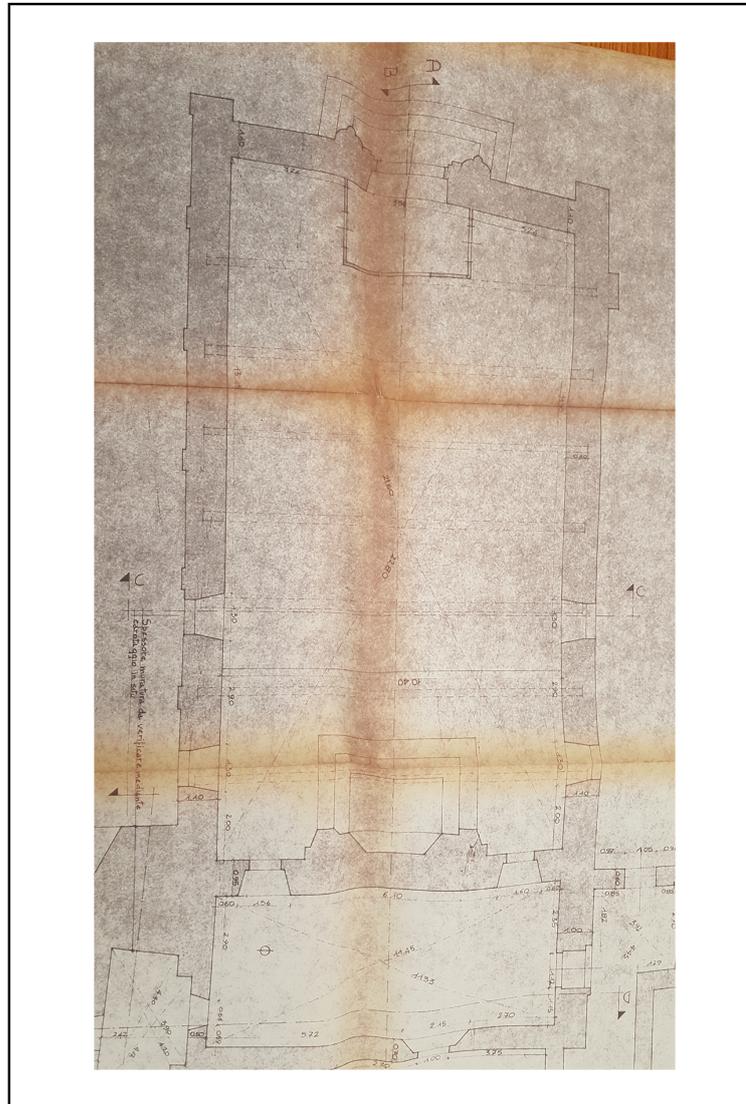
raddrizzate per mezzo di linee verticali e orizzontali, o il metodo di calcolo geometrico, che produce fotogrammi raddrizzati per mezzo di punti di coordinate note o distanze.

Successivamente le immagini fotoraddrizzate sono state ulteriormente ritoccate con il software Adobe Photoshop per modificare, qualora fosse necessario, i contrasti di luce, la luminosità e l'intensità dei colori.

Successivamente, i documenti fotoraddrizzati, sono stati schedati con didascalie che ne descrivessero il contenuto, la presenza o meno delle quote, annotazioni riguardanti lo stato di conservazione del documento o eventuali informazioni aggiuntive su difetti d'immagine prodotti al momento dello scatto del documento. A tutti i file della riproduzione dei disegni è stata associata una scala, per garantire il rispetto delle proporzioni e una coerenza visiva.

Si riporta nelle pagine seguenti la schedatura dei disegni del rilievo del 1980.

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

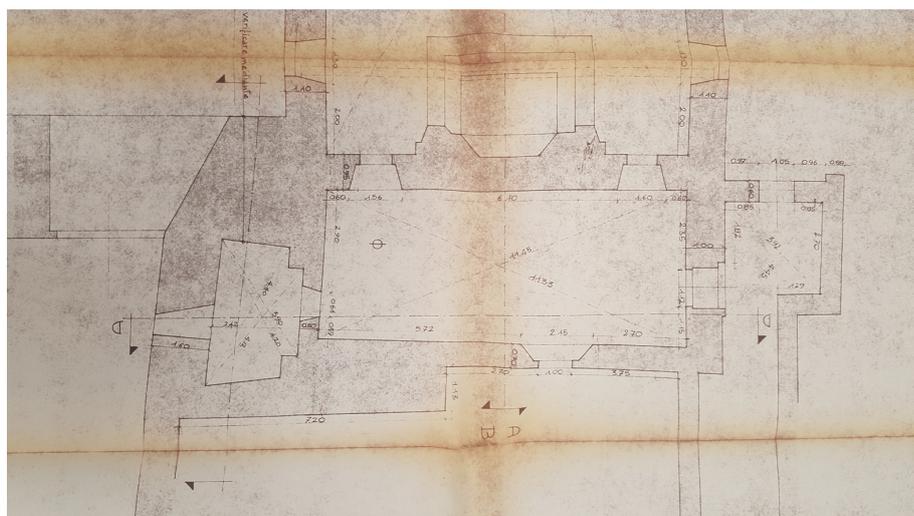
Descrizione: Planimetria

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Sì

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m



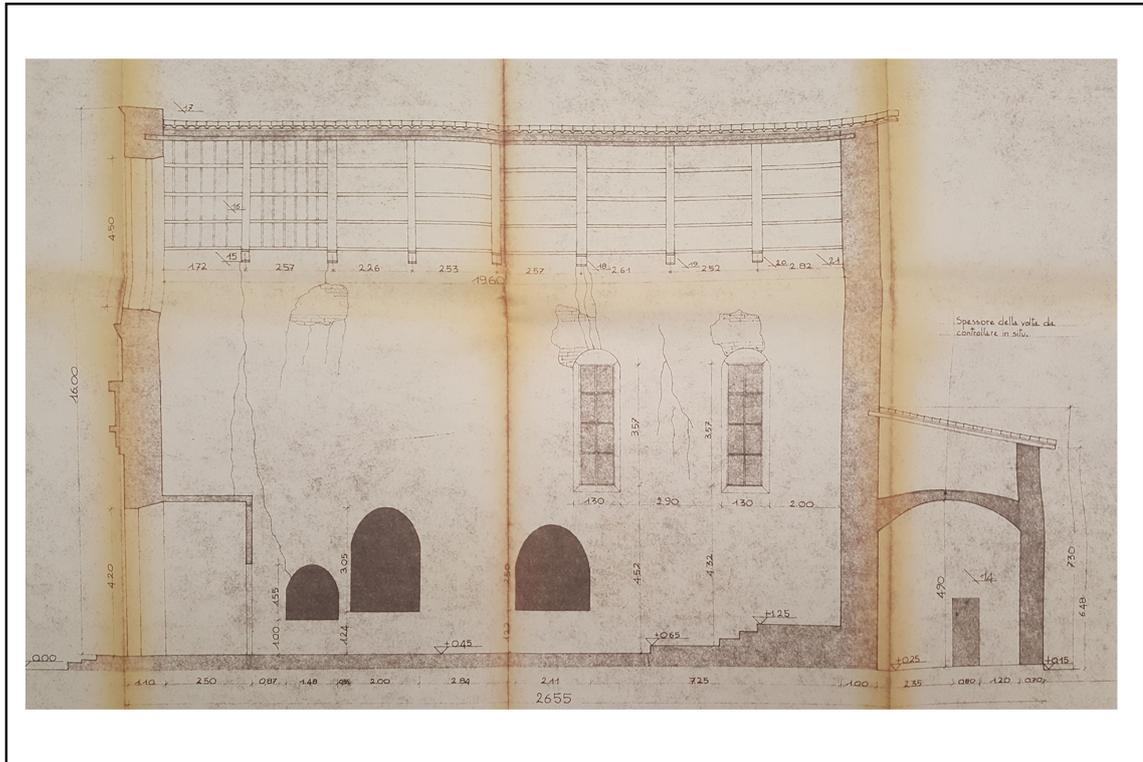
Descrizione: Planimetria Sacrestia e Porta Carbonara

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Sì

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

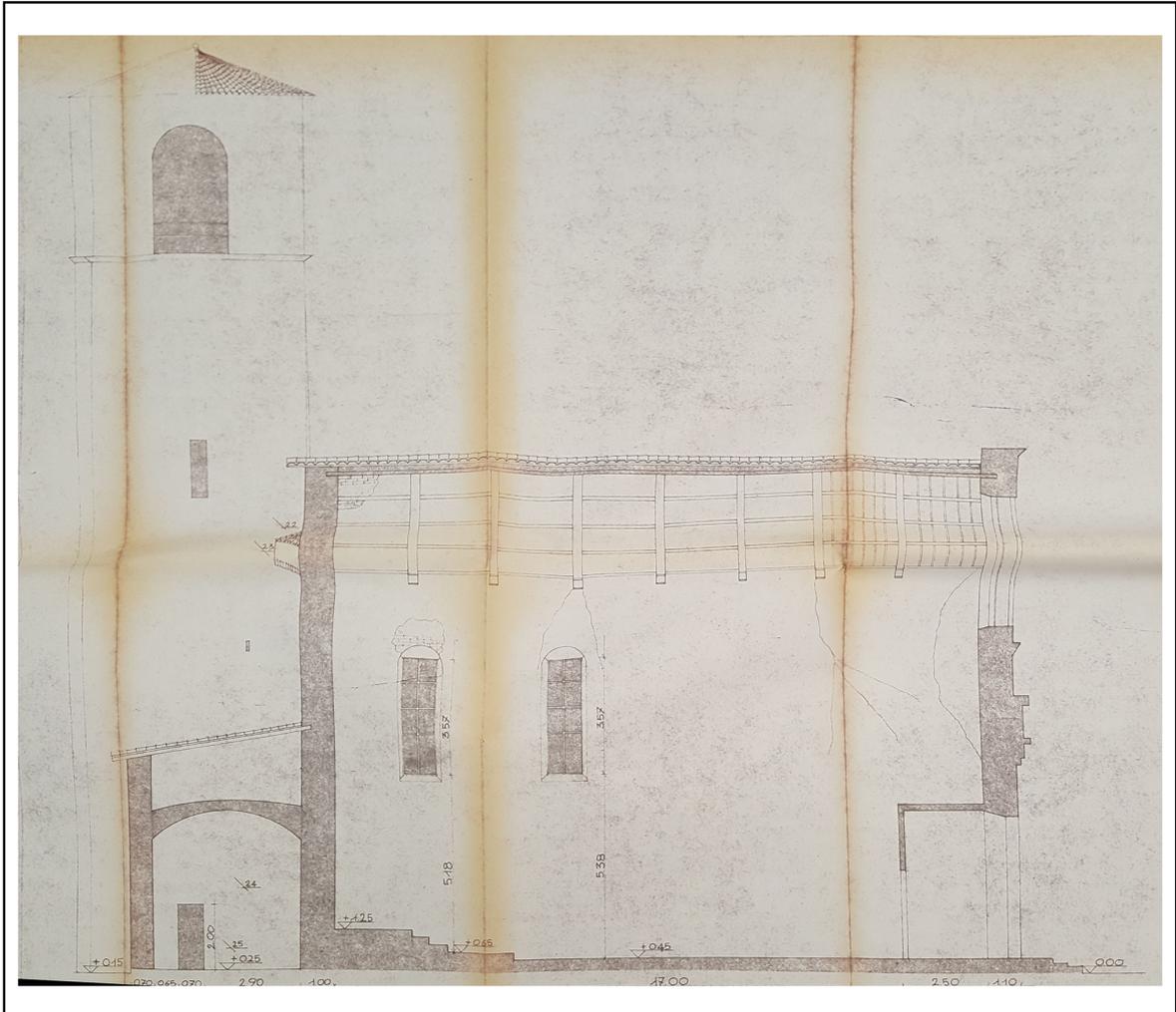
Descrizione: Sezione A-A'

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Si

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio;

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

Descrizione: Sezione B-B'

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Sì

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

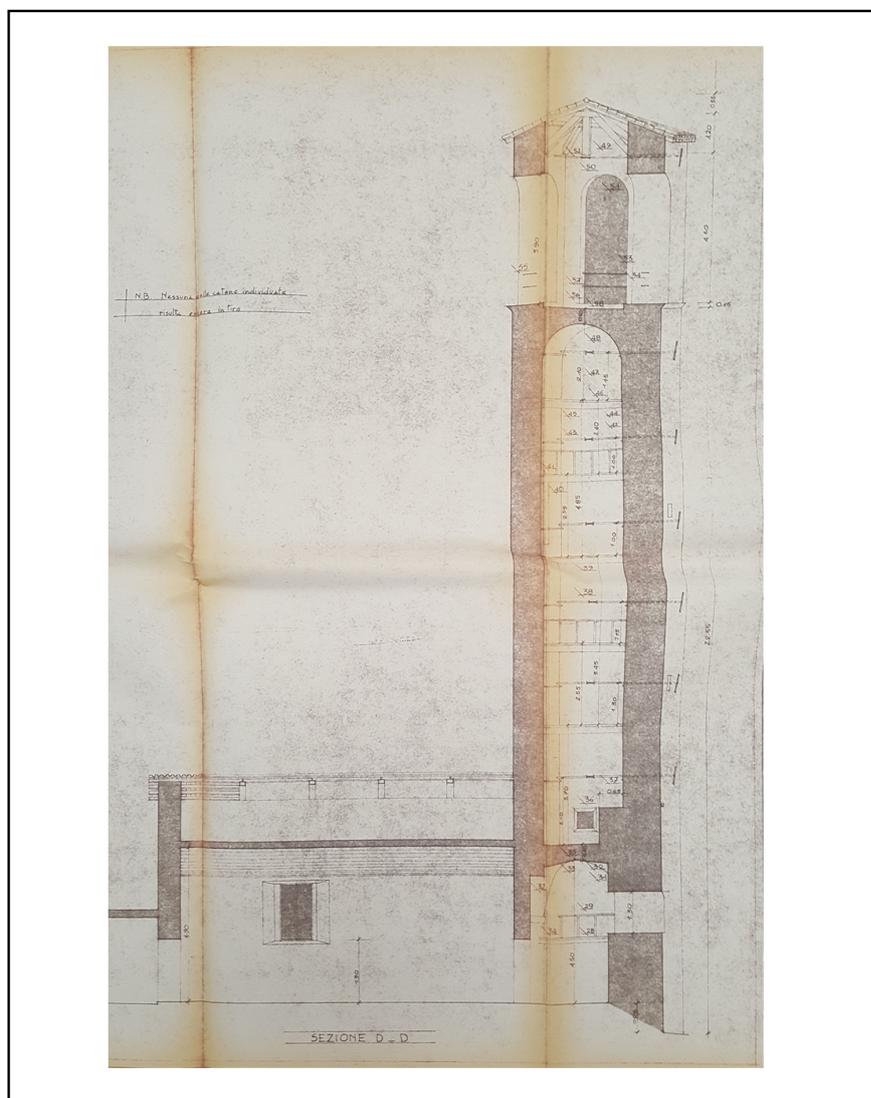
Descrizione: Sezione C-C'

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Sì

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

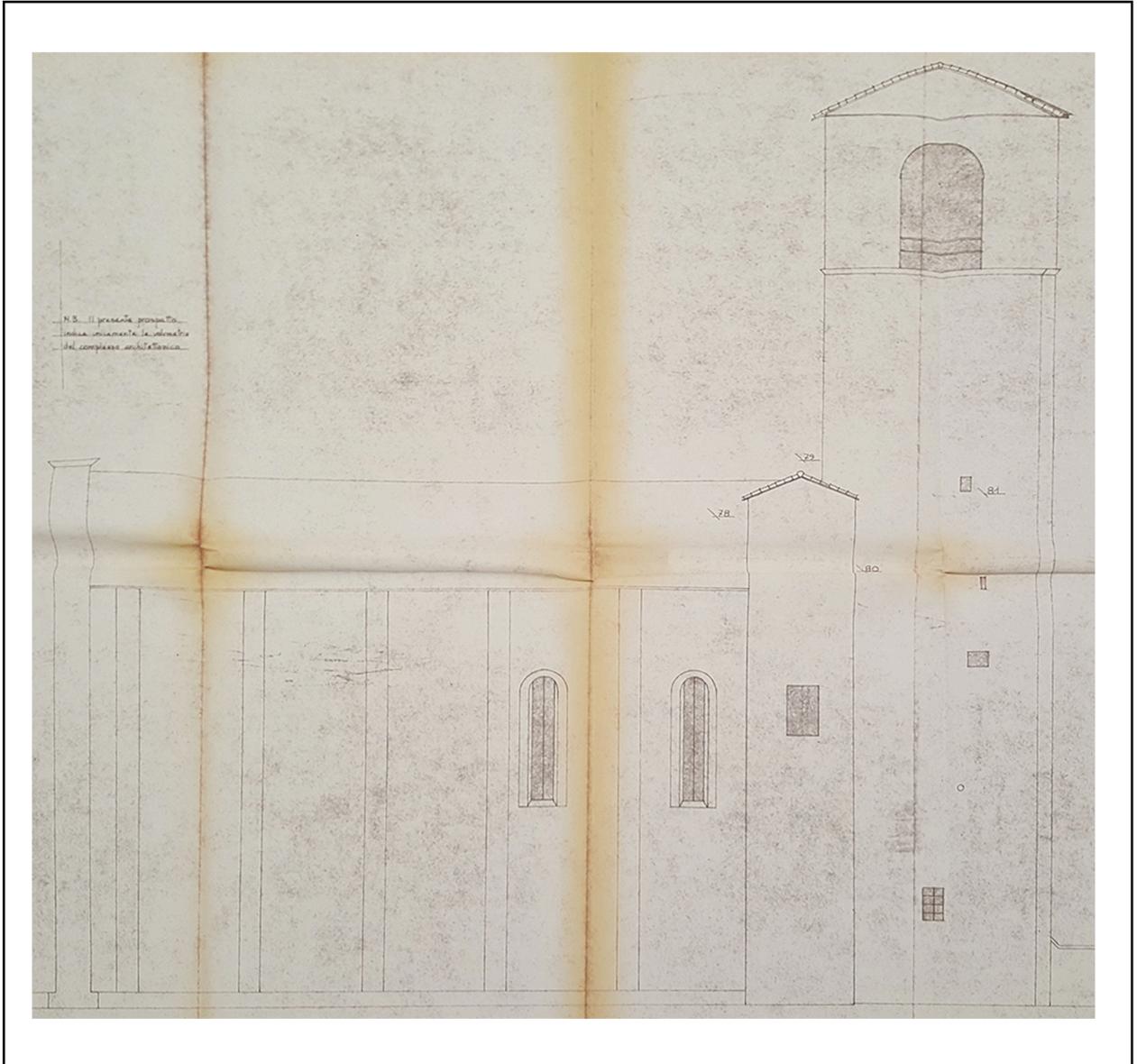
Descrizione: Sezione D-D'

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: Sì

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

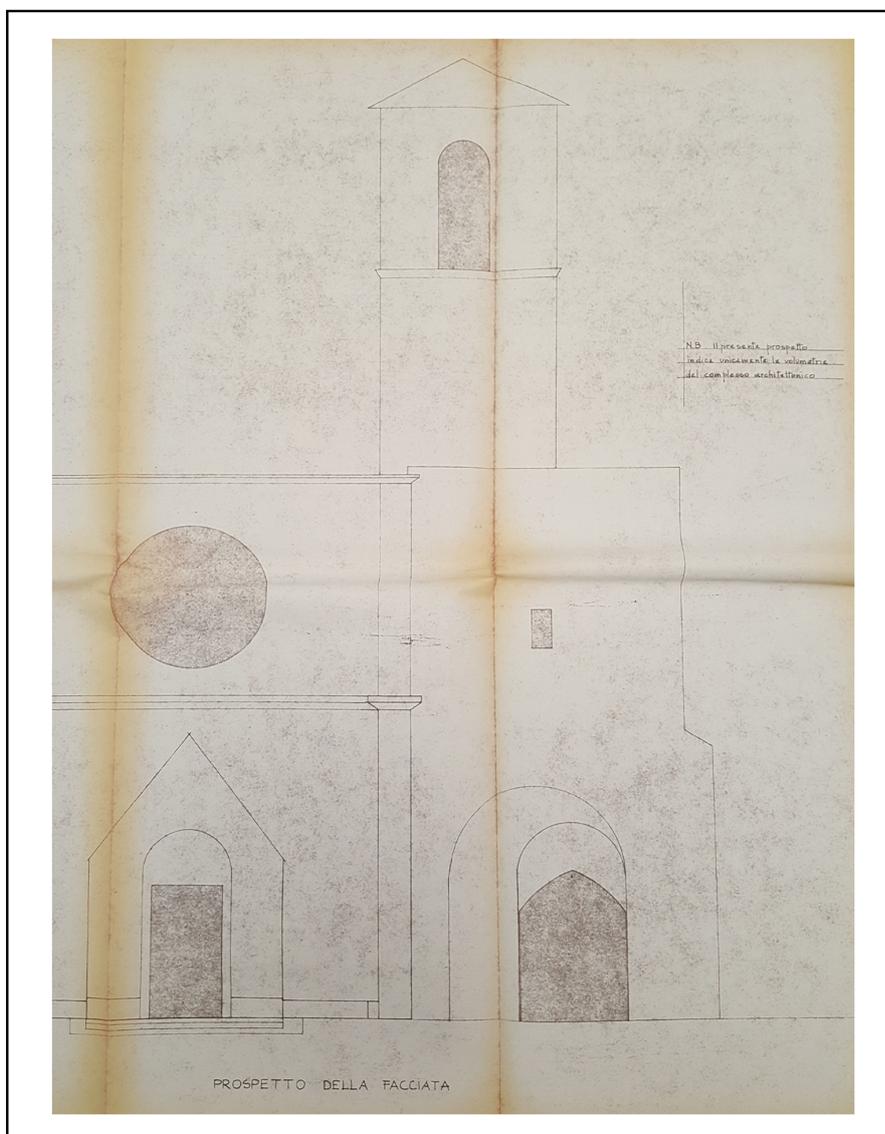
Descrizione: Prospetto Est

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: No

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio

Rilievo della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice anno 1980



0 2m 4m 6m 8m 10m

Descrizione: Facciata Principale

Tecnica: Disegno Tecnico a mano

Quotato: No

Note: Difetti dovuti alla piegatura del foglio;
Parti Mancanti dovuti allo scatto precedente al raddrizzamento;

3.4. RICOSTRUZIONE DELLO STATO DI FATTO PRIMA DEL SISMA

Il passaggio molto importante, durante questo lavoro di ricerca, è stato quello di ricostruire lo stato di fatto della chiesa nel momento precedente al terremoto, indentificato come T0. Questa operazione è stata possibile integrando alle ortofoto, ottenute dai rilievi, il materiale reperito dalla Soprintendenza. È stato, quindi, possibile restituire in formato vettoriale la planimetria, i quattro prospetti e le sezioni della chiesa di Sant'Agostino, al momento T0, utilizzando il software AutoCAD 2018 Education⁸¹.

Durante questa fase di elaborazione, è stato necessario porre una lettura critica dei documenti, relativi al rilievo del 1980, in possesso. Questi, nonostante le operazioni di fotoritocco effettuate, hanno presentato alcune criticità a livello grafico in quanto, durante la fase di fotoraddrizzamento, non è stato possibile eliminare difetti dovuti alla piegatura del foglio.

Il confronto tra i rilievi del 1980 con le ortofoto, estrapolate dalle nuvole di punti, ha fatto emergere sui documenti d'archivio errori sulla riproduzione grafica delle volumetrie del fabbricato. Come si può osservare dalle tavole, riportate nelle pagine seguenti, sui documenti d'archivio sono stati individuate le seguenti incongruenze: le dimensioni del campanile, raffigurato nel documento del rilievo piuttosto "basso e tozzo"; il colmo del tetto, disegnato ad una quota più alta rispetto alla realtà; le finestre poste sulle pareti laterali, riprodotte ad una distanza troppo ravvicinata;

⁸¹ <https://www.autodesk.it/education>

Tutte queste considerazioni sono state desunte da un confronto con la "realtà" raffigurata dall'ortofoto caratterizzate da una natura metrica.

L'aspetto vantaggioso dei documenti rinvenuti, invece, è stata la presenza della quotatura del rilievo. Ciò ha permesso di potervi attingere per verificare le misurazioni delle piccole distanze, che presumibilmente sono state ottenute all'epoca attraverso un rilievo diretto sul manufatto architettonico.

Si riportano nelle pagine seguenti:

Due tavole prodotte sul confronto tra i documenti d'archivio, utilizzati per la ricostruzione T0 della chiesa, e le ortofoto, estrapolate dal modello tridimensionale T1, in cui emergono le discrepanze rilevate;
Cinque tavole raffiguranti il tempo T0: della pianta, delle quattro facciate della Chiesa di Sant'Agostino in scala 1:200.

- TAVOLA 1: Confronto Rilievi 1980 – Ortofoto T1

- TAVOLA 2: Confronto Rilievi 1980 – Ortofoto T1

- TAVOLA 3: Ricostruzione T0 – Pianta

- TAVOLA 4: Ricostruzione T0 – Prospetto Principale

- TAVOLA 5: Ricostruzione T0 – Fronte Sud-Est

- TAVOLA 6: Ricostruzione T0 – Fronte Nord-Ovest

- TAVOLA 7: Ricostruzione T0 – Fronte Est

3.5. ANALISI MULTI-TEMPORALE DEL CASO STUDIO

L'obbiettivo principale di questo lavoro di tesi è fornire una serie di elaborati, utili alla valutazione del danno subito dal manufatto, estrapolati da modelli 3D, caratterizzati da una metrica controllata e da un livello molto alto di dettaglio, prodotti con soluzioni di acquisizione tramite droni e immagini digitali terrestri.

Le nuvole dense e mesh tridimensionali, prodotte dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, "poiché georeferenziate, sono state ottimizzate per la gestione e l'analisi 3D, mediante filtraggio e segmentazione."⁸² Ciò ha permesso di intraprendere un lavoro di indagine, sull'analisi multi-temporali del comportamento della chiesa di Sant'Agostino durante gli eventi sismici, in cui si inserisce la suddetta tesi.

Quindi, successivamente all'elaborazione del tempo T0, in formato vettoriale, sono stati prodotti una serie di elaborati, di ugual natura, riguardanti lo stato di crollo dei tempi T1 (Settembre 2016), T2 (Dicembre 2016) e T3 (Febbraio 2017), con l'utilizzo del software AutoCAD Education 2018.

Al fine di creare elaborati che dessero la possibilità di far emergere in modo chiaro i danni causati dal terremoto, sono stati sovrapposti, alle ortofoto in trasparenza dei tre tempi di ogni prospetto della chiesa, i disegni vettoriali prodotti della fase T0. Ciò ha permesso di mettere in risalto, oltre allo stato della muratura al momento del rilievo (layer verde), tutto ciò che allo stato di fatto, del

⁸² Chiabrandò, A. Di Lollì, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè "MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)"

rilievo considerato, è ancora esistente (ortofoto) rispetto alle porzioni di edificio crollate (disegno cad).

Inoltre, sempre grazie alla natura metrica delle ortofoto estratte dalle nuvole di punti, è stato possibile produrre ulteriori elaborati grafici raffiguranti, oltre allo stato della muratura del manufatto (layer verde), le lesioni e i dissesti rilevati sulle quattro facciate della chiesa (layer rosso), per ciascuna delle tre fasi di rilievo post evento sismico.

Utile all'elaborazione dei disegni, oltre ai modelli 3D e alle ortofoto, è stato fondamentale anche l'osservazione dei singoli fotogrammi prodotti durante i rilievi e delle immagini reperite sul web.

Lo scopo finale di questo lavoro, è stato quello di produrre elaborati grafici che mettessero in luce, in modo chiaro e preciso, i danni, provocati dal susseguirsi di scosse di terremoto nel tempo, rilevati, "mediante l'integrazione di tutti i dati derivati dalle indagini geomatiche"⁸³, sulla chiesa di Sant'Agostino. Utile all'elaborazione dei disegni, oltre ai modelli 3D e alle ortofoto, è stato fondamentale anche l'osservazione dei singoli fotogrammi prodotti durante i rilievi e delle immagini reperite sul web.

Inoltre, grazie all'integrazione dei documenti reperiti dalla Soprintendenza, è stato possibile rappresentare il comportamento delle lesioni preesistenti a confronto con i successivi crolli avvenuti dopo l'evento sismico.

⁸³ Chiabrandò, A. Di Lollì, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè "MULTITEMPORAL 3D MODELLING FOR CULTURAL HERITAGE EMERGENCY DURING SEISMIC EVENTS: DAMAGE ASSESSMENT OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE (RI)"

3.5.1. ANALISI MULTI- TEMPORALE DEI CROLLI

Successivamente alla prima scossa di terremoto, del 24 Agosto 2016, il complesso architettonico della chiesa di Sant'Agostino ha subito notevoli danni, come crolli totali o parziali di parti di struttura.

Nello specifico, la chiesa ha subito un parziale crollo del prospetto principale e del tetto in corrispondenza delle parti di facciata alterate con l'aumento e l'aggiunta del rosone tra il 1933 e il 1935, e il crollo totale di Porta Carbonara, adiacente al fronte Sud-Est della chiesa. Permangono ancora preservati, il campanile, la porzione di facciata, in cui è inserito il portale, il fronte Nord-Ovest e il fronte Est.



Figura 3.8. Immagini rilievo T1 Settembre 2016. Img.1: Crollo parziale del Prospetto principale (rilievo fotogrammetrico terrestre); Img.2: Crollo totale di Porta Carbonara; Img.3-4 Prospetto Ovest, Prospetto Sud e Campanile integri (Rilievo UAV con il drone INSPIRE 1 condotto dal gruppo RPAS dei Vigili del Fuoco)

Nella pagina seguente viene riportata la tavola, redatta in formato A3, raffigurante l'analisi sincronica dei crolli avvenuti sul manufatto architettonico, della chiesa di Sant'Agostino, successivamente all'evento sismico del 24 Agosto 2016.

Grazie alle acquisizioni e alle successive elaborazioni, sopra citate, è stato possibile realizzare un elaborato che mette chiaramente in risalto le volumetrie del manufatto architettonico crollate a confronto con la struttura complessiva prima del sisma.

Ciò è stato possibile sovrapponendo alle ortofoto dei quattro fronti della chiesa, estrapolate dal modello tridimensione T1, i disegni in formato vettoriale riferiti al momento precedente al sisma. Sull'elaborato si evidenziano, quindi, le porzioni di struttura conservate intatte dopo il terremoto, tramite l'ortofoto T1, e la volumetria complessiva dell'edificio precedente al sisma, tramite il disegno vettoriale T0. Inoltre, utilizzando il layer verde, si mostra il profilo dello stato della muratura ancora in piedi successivamente all'evento sismico.

Come già ampiamente descritto nei paragrafi precedenti, la costruzione di questa analisi è stata possibile grazie all'utilizzo dei dati acquisiti durante le indagini geomatiche effettuate, sul manufatto architettonico, nel mese di Settembre 2016 dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, i quali hanno impiegato tecniche di rilievo topografico e fotogrammetrico terrestre, in collaborazione con il gruppo RPAS dei Vigili del fuoco che ha effettuato rilievi fotogrammetrici UAV.

- TAVOLA 8: T1- Settembre 2016

Il 30 Ottobre 2016 un secondo evento sismico danneggia ulteriormente il manufatto architettonico già indebolito dal precedente terremoto. Si registrano ulteriori crolli sul lato destro della facciata principale, probabilmente indebolita da precedenti terremoti avvenuti in questa zona nella prima parte del 20 ° secolo⁸⁴, conservando ancora intatto il portale di ingresso in marmo, e sulla cella campanaria superiore della torre, la quale risulta essere la parte più debole dei campanili a causa delle ampie aperture ampie e dei sottili piedritti. Inoltre, la scossa di terremoto lede gravemente la struttura del fronte Est, in cui si rileva il crollo in corrispondenza dell'infilso, sul lato destro della parete dell'edificio, e il cedimento totale della costruzione, adiacente e retrostante, di pertinenza della chiesa e infine crolla una porzione del prospetto Nord-Ovest in corrispondenza della finestra oblunga destra.



Figura 3.9. Immagini rilievo T2 Dicembre 2016. Img.1: Proseguimento del crollo parziale del prospetto principale (rilievo fotogrammetrico terrestre); Img.2: Crollo in corrispondenza della finestra prospetto Ovest, Img.3 Crollo cella campanaria e Img. 4 crollo porzione di parete prospetto Sud e edificio adiacente retrostante (Rilievo UAV con il drone Phantom 4 condotto dal gruppo RPAS dei Vigili del Fuoco).⁸⁵

⁸⁴ A. Grazzini, F. Chiabrandò, S. Foti, A. M. Lingua, A. T. Spanò "DAMAGE ASSESSMENT AND SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE", Giugno 2018.

⁸⁵ ibidem

Nella pagina successiva viene riportata la tavola, raffigurante l'analisi sincronica dei crolli avvenuti sul manufatto architettonico, della chiesa di Sant'Agostino, successivamente all'evento sismico del 30 Novembre 2016.

Con la stessa metodologia descritta precedentemente, sono stati utilizzati come documenti di partenza i dati ottenuti dalle acquisizioni effettuate durante le indagini geomatiche, sul manufatto architettonico, nel mese di Novembre 2016 dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino in collaborazione con il GEER Team e il gruppo RPAS dei Vigili del fuoco, i quali hanno rispettivamente effettuato rilievi fotogrammetrici terrestri e UAV.

Anche in questo caso, è stato possibile realizzare un elaborato che mette chiaramente in risalto le volumetrie del manufatto architettonico crollate a confronto con le volumetrie rimaste integre successivamente al primo terremoto.

Pertanto, sono stati sovrapposti alle ortofoto dei quattro fronti della chiesa, estrapolate dal modello tridimensione T2, i disegni in formato vettoriale riferiti al momento successivo al primo evento sismico. Sull'elaborato si evidenziano, quindi, le porzioni di struttura conservate intatte dopo il secondo sisma, tramite l'ortofoto T2, e le porzioni di edificio preservate integre dopo il primo terremoto, tramite il disegno vettoriale T1. Inoltre, utilizzando il layer verde, si mostra il profilo dello stato della muratura ancora in piedi successivamente al secondo evento sismico.

- TAVOLA 9: T2 - Dicembre 2016

Infine, la scossa di terremoto del 18 Gennaio 2017 ha causato il crollo di gran parte della struttura mantenendo preservata, ancor oggi, la parete Sud-Est e, grazie all'intervento provvisorio di centinatura lignea per sorreggere la struttura, parzialmente la facciata principale in cui è incastonato il portale d'ingresso. Pertanto, crollano quasi completamente il prospetto Est, il prospetto Nord-Ovest e la torre campanaria.



Figura 3.10. Immagini rilievo T2 Febbraio 2017. Img.1: Proseguimento del crollo del prospetto principale (rilievo fotogrammetrico terrestre); Img.2: Prospetto Est integro, Img.3 Crollo quasi totale prospetto Sud, Img. 4 crollo quasi totale prospetto Ovest (Rilievo UAV con il drone INSPIRE 1 condotto dal gruppo RPAS dei Vigili del Fuoco).⁸⁶

Di seguito viene riportata la tavola, raffigurante l'analisi sincronica dei crolli avvenuti sul manufatto architettonico, della chiesa di Sant'Agostino, successivamente all'evento sismico del 18 Gennaio 2017.

⁸⁶ ibidem

Per questa tavola d'analisi, sono stati impiegati i dati ottenuti dai rilievi effettuati durante le indagini geomatiche, sul manufatto architettonico, il giorno seguente al sisma, dal gruppo RPAS dei Vigili del fuoco, i quali hanno effettuato rilievi fotogrammetrici UAV.

Anche in quest'ultimo caso, è stato possibile produrre un elaborato che mette chiaramente in risalto le volumetrie della chiesa crollate a confronto con le volumetrie rimaste integre successivamente al secondo terremoto.

Pertanto, sono stati sovrapposti alle ortofoto dei quattro fronti della chiesa, estrapolate dal modello tridimensione T3, i disegni in formato vettoriale riferiti al momento successivo al secondo evento sismico. Sull'elaborato si evidenziano, quindi, le porzioni di struttura conservate intatte dopo il terzo evento sismico, tramite l'ortofoto T3, e le porzioni di edificio preservate intatte dopo il secondo terremoto, tramite il disegno vettoriale T2. Inoltre, utilizzando il layer verde, si mostra il profilo dello stato della muratura ancora in piedi successivamente al terzo evento sismico.

- TAVOLA 10: T3 - Febbraio 2017

3.5.2. ANALISI MULTITEMPORALE DELLE LESIONI

Un'ulteriore analisi più approfondita è stata prodotta, per ogni facciata della chiesa di Sant'Agostino, per individuare e confrontare le lesioni e i dissesti che si sono verificati nel susseguirsi degli eventi.

Tale confronto si auspica possa permettere, a tecnici esperti in materia di diagnostica delle strutture, di studiare il comportamento della struttura muraria in prossimità dei danneggiamenti provocate dalle scosse di terremoto prima del collasso.

Pertanto, grazie all'elevato livello di dettaglio e di risoluzione grafica delle ortofoto, estrapolate dai tre modelli tridimensionali, è stato possibile individuare tutte quelle fessurazioni e dissesti, identificate con il layer rosso, che nel susseguirsi degli eventi sismici hanno provocato il collasso della struttura.

Ai dati acquisiti dal rilievo metrico è stato utile, a quest'analisi più specifica, l'integrazione delle informazioni fornite dal rilievo reperito dalla Soprintendenza, raffigurante lo stato di fatto al 1980. Tale documentazione infatti, come si può vedere dalla Figura 3.7, individua la presenza di lesioni in corrispondenza del rosone sul prospetto principale e sulle finestre oblunghe dei prospetti laterali.



Figura 3.11. Documenti del Rilievo 1980 da cui sono state ricavate le lesioni precedenti agli avvenimenti sismici del 2016/2017. (Img.1 lesioni corrispondenti al prospetto Ovest, Img.2 al prospetto Est, Img. 3 al prospetto principale.)

Inoltre, un'immagine significativa di riferimento reperita sul web (figura 3.8) mostra la presenza di un indebolimento del prospetto principale già intorno ai primi anni del Novecento, probabilmente tamponato durante i lavori di restauro all'epoca del fascismo.

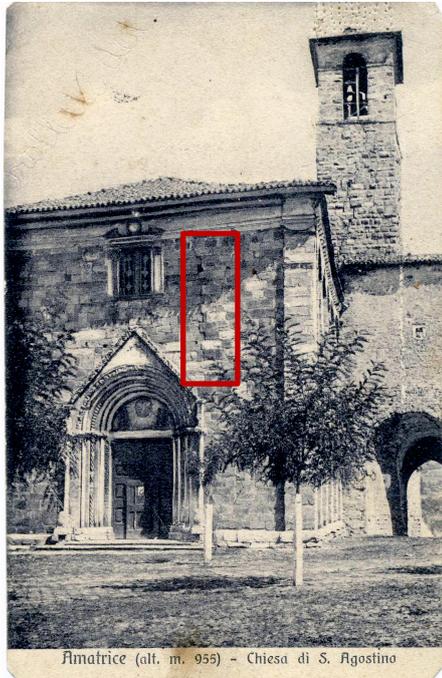


Figura 3.12. Fotografia di riferimento della chiesa di Sant'Agostino intorno ai primi anni del Novecento. Il riquadro rosso evidenzia la presenza di una notevole crepa sul prospetto principale della chiesa.

Tutte le informazioni raccolte in merito alle lesioni, precedenti e successive al terremoto del centro Italia, sono servite a produrre un'analisi diacronica. Si lasciano formulare, a tecnici esperti in materia, considerazioni in merito ad un livello di debolezza della struttura già esistente prima dello sciame sismico del 2016/2017.

- TAVOLA 11: T1- T2 – T3 Prospetto principale

Il Prospetto principale, durante il susseguirsi degli eventi sismici, ha subito lesioni profonde, sulla muratura, che sono state confrontate con lesioni presenti, sul fronte principale, prima dell'evento sismico del 2016-2017. Quest'analisi sincronica permette di verificare se le lesioni evidenziate sono i presupposti iniziali del ripetuto cedimento strutturale.

Per l'elaborazione di questa tavola, come precedentemente accennato, sono stati integrati alle ortofoto del prospetto principale, estratte dai modelli T1, T2 e T3, il documento del Rilievo del 1980, raffigurante la sezione trasversale C-C', e il riferimento fotografico (figura 3.8) reperito sul web. Questi documenti hanno permesso di evidenziare, lesioni interne ed esterne, "a taglio ad andamento a scaletta", presenti sul fronte principale della chiesa, prima degli eventi sismici del 2016.

L'andamento delle lesioni del momento T0, e di quelle generate dai terremoti con le medesime caratteristiche, rilevate dalle ortofoto, sono state riportate sui disegni vettoriali dei tre tempi di crollo del prospetto principale. Questa procedura ha permesso di verificare che i crolli e le ulteriori lesioni, generati dai terremoti, si sono verificati maggiormente in corrispondenza del già presente indebolimento della struttura del prospetto principale presente prima degli eventi sismici. Pertanto, è possibile ipotizzare che la struttura del prospetto principale fosse già instabile prima dello sciame sismico.

Nella pagina seguente viene riportata la tavola, in formato A3, in cui vengono raffigurate le lesioni estrapolate: dalle ortofoto T1, T2, T3 (layer rosso); dai documenti d'archivio (layer ciano) dai riferimenti fotografici (layer giallo).

- TAVOLA 12: T1- T2 – T3 Fronte Sud-Est

Il fronte Sud-Est, ancor 'oggi quasi totalmente integro, durante il susseguirsi degli eventi sismici ha subito lesioni significative, sulla muratura, che sono state confrontate con le lesioni presenti, sul medesimo fronte, prima dell'evento sismico del 2016-2017. Quest'analisi sincronica permette di verificare se le lesioni evidenziate sono i presupposti iniziali del ripetuto cedimento strutturale.

Per l'elaborazione di questa tavola, è stato integrato alle ortofoto del fronte Sud-Est, estratte dai modelli T1, T2 e T3, il documento del Rilievo del 1980, raffigurante la sezione longitudinale B-B'. Questo documento ha permesso di individuare lesioni interne presenti prima degli eventi sismici del 2016. Non è stato possibile reperire documenti che mostrassero lesioni sul lato esterno del fronte.

L'andamento delle lesioni del momento T0 e di quelle generate dai terremoti, anch'esse valutate "a taglio con un andamento a scaletta", rilevate dalle ortofoto sono state riportate sui disegni vettoriali dei tre tempi di crollo del fronte Sud-Est. Questa procedura permette di verificare se il crollo parziale e le ulteriori lesioni, generati dai terremoti, si sono verificati maggiormente in corrispondenza del già presente indebolimento della struttura. Si lasciano formulare, a tecnici esperti in materia, considerazioni in merito al, fortunatamente, mancato crollo di questo fronte rispetto agli altri.

Nella pagina seguente viene riportata la tavola, in formato A3, in cui vengono raffigurate le lesioni estrapolate: dalle ortofoto T1, T2, T3 (layer rosso); dai documenti d'archivio (layer ciano) dai riferimenti fotografici (layer giallo).

- TAVOLA 13: T1- T2 – T3 Fronte Nord-Ovest

Il fronte Nord-Ovest, quasi totalmente crollato, durante il susseguirsi degli eventi sismici ha subito nel tempo lesioni profonde, sulla muratura, che sono state confrontate con le lesioni presenti, sul medesimo fronte, prima dell'evento sismico del 2016-2017. Quest'analisi sincronica permette di verificare se le lesioni evidenziate sono i presupposti iniziali del ripetuto cedimento strutturale.

Anche per l'elaborazione di questa tavola, è stato integrato alle ortofoto del fronte Sud-Est, estratte dai modelli T1, T2 e T3, un documento del Rilievo del 1980, raffigurante la sezione longitudinale A-A'. Questo documento ha permesso di individuare lesioni interne presenti prima degli eventi sismici del 2016. Non è stato possibile reperire documenti che mostrassero lesioni sul lato esterno del fronte.

Anche in questo caso, l'andamento delle lesioni del momento T0 e di quelle generate dai terremoti, rilevate dalle ortofoto sono state riportate sui disegni vettoriali dei tre tempi di crollo del fronte Nord-Ovest. Questa procedura ha permesso di verificare che il crollo, quasi totale, del fronte si è verificato in corrispondenza delle lesioni verticali in corrispondenza del già presente indebolimento della struttura, che ha causato anche il cedimento totale del tetto.

Nella pagina seguente viene riportata la tavola, in formato A3, in cui vengono raffigurate le lesioni estrapolate: dalle ortofoto T1, T2, T3 (layer rosso); dai documenti d'archivio (layer ciano) dai riferimenti fotografici (layer giallo).

- TAVOLA 14: T1- T2 – T3 Fronte Est

Infine, durante lo sciame sismico 2016-2017, sul fronte Est si sono formate lesioni importanti sulle murature, rilevate dalle ortofoto, che sono state riportate sui disegni vettoriali dei tre tempi di crollo del fronte Est. In questo caso, non è stato reperito alcun documento che individuasse la presenza di un indebolimento della struttura del fronte, precedente ai terremoti. Pertanto, è stata elaborata un'analisi sincronica, sulle sole lesioni generate dalle scosse sismiche, che permette di verificare se sono i presupposti iniziali del crollo quasi totale del fronte.

Per l'elaborazione di questa tavola, quindi, sono state utilizzate solo le ortofoto del fronte Est, estratte dai modelli T1, T2 e T3. Questi dati hanno permesso di evidenziare, lesioni "a taglio ad andamento a scaletta" presenti sul fronte Est della chiesa, generate dai tre eventi sismici.

Questa procedura ha permesso di verificare che i crolli e le ulteriori lesioni si sono verificati maggiormente in corrispondenza dell'indebolimento della struttura, causato dalle scosse di terremoto.

Nella pagina seguente viene riportata la tavola, in formato A3, in cui vengono raffigurate le lesioni estrapolate: dalle ortofoto T1, T2, T3 (layer rosso).

4. CONCLUSIONI

In conclusione, è possibile affermare che la disciplina della Geomatica svolge un ruolo fondamentale in merito al supporto delle situazioni di emergenza post eventi sismici dei beni architettonici.

Le tecniche di rilievo metrico integrato con il supporto delle strumentazioni innovative consentono di ottenere una grande quantità di dati, facilitando gli interventi di rilievo, in maggior sicurezza per gli operatori, e in tempi considerevolmente ridotti, rispetto alle operazioni di rilevamento tradizionali. Questo vantaggio permette, quindi, un rapido censimento dei beni coinvolti per attuarne la messa in sicurezza e un rapido ritorno alla normalità, compreso il recupero precoce di edifici, limitatamente coinvolti, e delle infrastrutture.

È possibile affermare, inoltre, che la continua evoluzione delle tecnologie permetterà in futuro una sempre più rapida, automatica e sicura gestione delle operazioni di rilievo metrico.

I dati acquisiti, durante le operazioni di rilievo, sono prontamente gestibili e elaborabili grazie all'elevato automatismo dei software ad ora a disposizione. Questi, inoltre, contengono una elevata quantità di informazioni complete e di precisione, utili alla creazione di diverse tipologie di elaborati adatti ad analisi specifiche. Ad esempio, lo studio sulla multi-temporalità dei danni prodotti dal terremoto, condotto nel presente lavoro di tesi, si auspica possa essere utile a tecnici in materia di diagnostica delle strutture.

Gli elaborati prodotti, essendo in formato digitale, possono essere istantaneamente condivisi, per mezzo di soluzioni web, con i vari operatori esperti e enti coinvolti nell'indagine post-sisma.

L'opportunità di poter integrare ai risultati acquisiti dai rilievi metrici la documentazione d'archivio, permette di riprodurre disegni tecnici completi e dettagliati, in scala, di edifici ancora parzialmente esistenti o esistiti, in formato vettoriale.

Pertanto, la metodologia proposta, basata sull'analisi dei dati acquisiti con tecniche innovative inerenti alla disciplina della Geomatica, può essere utile per i prossimi progetti di prevenzione degli edifici storici danneggiati nelle aree sismiche.

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1.1. SCHEMA SINTETICO DELLE COMPONENTI DI UN GIS.	13
FIGURA 1.2. RAPPRESENTAZIONE DELLA COSTELLAZIONE DI SATELLITI.....	20
FIGURA 1.3. SCHEMA MODALITÀ RTK.	21
FIGURA 1.4. RICEVITORE FISSO GNSS ; FIGURA 1.5. RICEVITORE MOBILE “ROVER” GNSS.....	22
FIGURA 1.6. STAZIONE TOTALE LEICA; FIGURA 1.7. PRISMA LEICA	24
FIGURA 1.8. RAPPRESENTAZIONE DELLA PROSPETTIVA CENTRALE	27
FIGURA 1.9. EQUAZIONE DI COLLINEARITÀ	28
FIGURA 1.10. ESEMPIO DI DRONE ESACOTTERO.....	30
FIGURA 1.11. ESEMPIO DI DRONE AD ALA FISSA, MODELLO EBEEY SENSEFLY	30
FIGURA 1.12. FUNZIONAMENTO DEI SISTEMI DISTANZIOMETRICI.	35
FIGURA 1.13. FUNZIONAMENTO DEI SISTEMI TRIANGOLATORI	36
FIGURA 1.14. ESEMPIO LASER SCANNER FISSO, MODELLO FOCUS 3D, FARO; ESEMPIO LASER SCANNER MOBILE MODELLO FREESTYLE, FARO	36
FIGURA 2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE REGIONE LAZIO, PROVINCIA DI RIETI, AMATRICE. ...	39
FIGURA 2.2. STRALCIO CARTA GEOLOGICA D’ITALIA, IN SCALA 1: 100.000, FOGLIO 139, CON LA LOCALIZZAZIONE DI AMATRICE E MONTI DELLA LAGA.	40
FIGURA 2.3. STRALCIO CARTA TECNICA REGIONALE 1:5000, CON LA LOCALIZZAZIONE DELLA CHIESA DI SANT’AGOSTINO.	41
FIGURA 2.4. ANONIMO DEL ‘500, DIPINTO DEL 1556 CUSTODITO NELLA CHIESA DEL SS. CROCIFISSO RAPPRESENTANTE LE MURA DI AMATRICE.	44
FIGURA 2.5. E. LEAR: LEAR’S ILLUSTRATED EXCURSIONS IN ITALY, THOMAS M’LEAN, LONDON, 1846, VEDUTA DI AMATRICE DA OCCIDENTE.....	44
FIGURA 2.6. PERCORSO TURISTICO “PARCO IN MINIATURA”. A SINISTRA PORTA CARBONARA E IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI SANT’AGOSTINO	45
FIGURA 2.7. VEDUTE AEREE DELLA CONCA DI AMATRICE (RI) PRIMA DEL TERREMOTO.	45
FIGURA 2.8. VEDUTE AEREE DELLA CONCA DI AMATRICE (RI) PRIMA E DOPO IL TERREMOTO DELL’AGOSTO 2016.	46
FIGURA 2.9. DISTRIBUZIONE DELLE PORTE, DELLE CHIESE E DEGLI EDIFICI PIÙ ANTICHI TUTTI CONCENTRATI A OCCIDENTE DELLA VIA ROMA. ALL’INTERNO DEL RIQUADRO ROSSO VIENE MOSTRATA LA POSIZIONE DI PORTA CARBONARA.	47
FIGURA 2.10. E. LEAR’S ILLUSTRATED EXCURSIONS IN ITALY, LA CHIESA DI S. AGOSTINO E LA PORTA CARBONARA.	49
FIGURA 2.11. PROSPETTO PRINCIPALE CHIESA DI SANT’AGOSTINO PRIMA E DOPO L’AGGIUNTA DEL ROSONE DURANTE IL FASCISMO.....	49
FIGURA 2.12. IMMAGINI DEL PRIMA E DOPO IL TERREMOTO. IMMAGINI ACQUISITE DURANTE LE CAMPAGNE DI RILIEVO DI SETTEMBRE, FEBBRAIO DALLA TASK FORCE DEL POLITECNICO DI TORINO, DIOCESI DI RIETI E VIGILI DEL FUOCO.	50

FIGURA 3.1. LE CAMPAGNE DI RILIEVO MULTI-TEMPORALI POST SISMA.	54
FIGURA 3.2. OPERAZIONI DI RILIEVO TOPOGRAFICO MEDIANTE STAZIONE TOTALE E OPERAZIONI DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO UAV, GRUPPO RPAS DEI VIGILI DEL FUOCO CON INSPIRE 1. .	56
FIGURA 3.3. NUVOLA Densa T1- SETTEMBRE 2016	59
FIGURA 3.4. NUVOLA Densa T2 - DICEMBRE 2016.....	59
FIGURA 3.5. NUVOLA Densa T3 - FEBBRAIO 2017	59
FIGURA 3.6. ORTOFOTO T1, SETTEMBRE 2016: FACCIATA PRINCIPALE CHIESA DI SANT'AGOSTINO IN AMATRICE.....	60
FIGURA 3.7. ORTOFOTO T1, SETTEMBRE 2016: FACCIATA PRINCIPALE CHIESA DI SANT'AGOSTINO IN AMATRICE RITAGLIATA.....	61
FIGURA 3.9. IMMAGINI RILIEVO T1 SETTEMBRE 2016. IMG.1: CROLLO PARZIALE DEL PROSPETTO PRINCIPALE (RILIEVO FOTOGRAMMETRICO TERRESTRE); IMG.2: CROLLO TOTALE DI PORTA CARBONARA; IMG.3-4 PROSPETTO OVEST, PROSPETTO SUD E CAMPANILE INTEGRRI (RILIEVO UAV CON IL DRONE INSPIRE 1 CONDOTTO DAL GRUPPO RPAS DEI VIGILI DEL FUOCO)	83
FIGURA 3.10. IMMAGINI RILIEVO T2 DICEMBRE 2016. IMG.1: PROSEGUIMENTO DEL CROLLO PARZIALE DEL PROSPETTO PRINCIPALE (RILIEVO FOTOGRAMMETRICO TERRESTRE); IMG.2: CROLLO IN CORRISPONDENZA DELLA FINESTRA PROSPETTO OVEST, IMG.3 CROLLO CELLA CAMPANARIA E IMG. 4 CROLLO PORZIONE DI PARETE PROSPETTO SUD E EDIFICIO ADIACENTE RETROSTANTE (RILIEVO UAV CON IL DRONE PHANTOM 4 CONDOTTO DAL GRUPPO RPAS DEI VIGILI DEL FUOCO).	86
FIGURA 3.11. IMMAGINI RILIEVO T2 FEBBRAIO 2017. IMG. 1: PROSEGUIMENTO DEL CROLLO DEL PROSPETTO PRINCIPALE (RILIEVO FOTOGRAMMETRICO TERRESTRE); IMG.2: PROSPETTO EST INTEGRO, IMG.3 CROLLO QUASI TOTALE PROSPETTO SUD, IMG. 4 CROLLO QUASI TOTALE PROSPETTO OVEST (RILIEVO UAV CON IL DRONE INSPIRE 1 CONDOTTO DAL GRUPPO RPAS DEI VIGILI DEL FUOCO).	89
FIGURA 3.12. DOCUMENTI DEL RILIEVO 1980 DA CUI SONO STATE RICAVATE LE LESIONI PRECEDENTI AGLI AVENTI SISMICI DEL 2016/2017. (IMG.1 LESIONI CORRISPONDENTI AL PROSPETTO OVEST, IMG.2 AL PROSPETTO EST, IMG. 3 AL PROSPETTO PRINCIPALE.)	92
FIGURA 3.13. FOTOGRAFIA DI RIFERIMENTO DELLA CHIESA DI SANT'AGOSTINO INTORNO AI PRIMI ANNI DEL NOVECENTO. IL RIQUADRO ROSSO EVIDENZIA LA PRESENZA DI UNA NOTEVOLE CREPA SUL PROSPETTO PRINCIPALE DELLA CHIESA.	93

BIBLIOGRAFIA

Jab Whelan, Maria Cristina Pinocchino *"Scopriamo le scienze della Terra"*, Zanichelli editore 2018.

Briallo G., *"Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici"*, Ed. I Quaderni di Mondovì, 2006.

A. Cina, *"Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System). Per la Geomatica"*, Celi, Torino 2014.

Maurizio Trevisani, *"Cenni sui Sistemi Informativi Territoriali con appunti di geodesia, topografia e cartografia"* Ed. 2003.

Emanuela Caffa, *"SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI. Un percorso attraverso concetti e nozioni fondamentali per addentrarsi nel vasto mondo della Scienza della Informazione Geografica"*, ENEA Ente per le Nuove tecnologie l'Energia e l'Ambiente, 2006.

Canarazzo, Cucchiaini, Me schieri, *"Misure, rilievo, progetto"*, Ed. Zanichelli, 2012.

Roggero Marco, *"Manuale di Rilevamento diretto del corso di Laboratorio di geomatica per la modellazione dell'architettura"*, Settembre 2009.

Karl Kraus, *"Fotogrammetria"*, Libreria Universitaria Leprotto e Bella, Torino, 1994.

Antonia T. Spanò *"Slide corso di Fotogrammetria e scansione 3D"*, 2015-2016

F. Chiabrano, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammaritano, L. Steppati Losa, *"Multitemporal 3D modelling for cultural heritage emergency during seismic events: damage assessment of S. Agostino church in Amatrice (RI)"*

Carbonara G. *"1982 Gli insediamenti degli Ordini Mendicanti in Sabina, Lo spazio dell'umiltà"*, Atti del convegno di studi sull' edilizia dell'Ordine dei

minori, Fara Sabina, 3-6 Novembre 1982, Centro francescano Santa Maria in Castello, Fara Sabina.

Maurizio Coresi e Sara Battaglia, *"Il terremoto del centro-italia. La situazione e gli interventi normativi"*, Giugno 2018.

Daniele Amadio, *"Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il Restauro e Valorizzazione del Patrimonio Metodi di rilievo metrico 3D integrati per l'analisi del patrimonio industriale dismesso. Il caso del Paraboloide di Casale Monferrato"*, Relatore Prof. Antonia Teresa Spanò e Filiberto Chiabrandò, a.a. 2016/2017

Alice Villa, *"Tesi di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione e Città, Rocca medioevale di San Silvestro: modellazione 3D da rilievo UAV e laser scanning terrestre per lo studio e l'analisi del manufatto"* Relatore Prof. Antonia Teresa Spanò e Filiberto Chiabrandò, Febbraio-Marzo 2017.

A. Grazzini, F. Chiabrandò, S. Foti, A. M. Lingua, A. T. Spanò *"DAMAGE ASSESSMENT AND SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF S. AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE"*, Giugno 2018.

G. Sammartano *"Doctoral Dissertation in Suitability Of 3D Dense Models for Rapid Mapping Strategies on Cultural Heritage Documentation and Conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions."*, Febbraio 2018.

A. Spanò Saggio sulla *"Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica"* raccolta *"Patrimonio architettonico e rischio sismico. Un percorso tra conoscenza e obiettivi di conservazione"* Rosalba lentile, Monica Naretto, Celid, Luglio 2013.

Elisabetta Colucci *"Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto Sostenibile, Architettura e natura di paesaggi archeologici. Analisi spaziali integrate in ambiente WEB-GIS per la conservazione e la comunicazione storica: il Parco Archeominerario di San Silvestro"*, Relatore Prof. Antonia

Spanò, Corelatori Debora Brocchini, Filiberto Chiabrando, Francesca Noardo, Marzo 2017.

Antonia Spanò, Elisabetta Donadio, Filiberto Chiabrando *“Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili”* in Polymnia. Studi di Archeologia n.08 /2017.

SITOGRAFIA

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/schede_tecniche.wp?contentId=SCT20122

<http://www.studioingegneriadar.it/vulnerabilita-sismica/>

Paolo Corradeghini, "Che cosa devi sapere per usare un GPS di precisione" <https://3dmetrica.it/gps-nel-rilievo-topografico/>

"Il Rilievo Topografico"

<http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Fabrizio-G/materiali-/archivio/materiali-12/rilievo-topografico.pdf>

<https://www.openoikos.com/blog/le-basi-di-qgis-i-formati-dellinformazione-geografica/>

Marco Celotto "Laser scanner" (mat. 270966) IUAV–Corso di Informatica e Disegno Digitale del Prof. Maurizio Galluzzo <https://www.slideshare.net/MCelotto/laser-scanner>

<https://www.comune.amatrice.rieti.it/storia/>

Giovanni Alegiani "*Giulio Annibali. Le mura e le porte di Amatrice*", Novembre 2017. <http://www.collegentilesco.it/2017/11/15/le-mura-e-le-porte-di-amatrice/>.

http://www.lalbatros.it/index.php/costume/98-amatrice-viaggio-amaro-nella-memoria-tra-dolore-ricordi-e-speranza#_ftnref1

Romeo Giammarini, "*L'IMPIANTO URBANO DELLA CITTÀ DI AMATRICE. GEOMETRIE, ADATTAMENTI E TRASFORMAZIONI SECC. XIII-XV*" articolo contenuto nella rivista "*CENTRI DI FONDAZIONE E INSEDIAMENTI URBANI NEL LAZIO (XIII-XX SECOLO): DA AMATRICE A COLLEFERRO*"

edizione Kappa, Settembre 2017. La rivista è consultabile in versione PDF open access

Daniel Badino *“Studio per un progetto di Human dimension nel comune di amatrice: pianificazione e realizzazione di un'indagine conoscitiva”*, 2007.

<http://www.gransassolagapark.it/Pdf/progetti/PNGSLprogetti107-2.pdf>

<http://www.storiadellacitta.it/category/biblioteca/riviste/>

<http://www.enciclopediatreccani.it>

<http://www.cartografia.regione.lazio.it>

Agostino Bagnato, *“AMATRICE. VIAGGIO AMARO NELLA MEMORIA TRA DOLORE RICORDI E SPERANZA”*,

<http://www.lalbatros.it/index.php/costume/98-amatrice-viaggio-amaro-nella-memoria-tra-dolore-ricordi-e-speranza>

RINGRAZIAMENTI