



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

Corso di Dottorato in
Metodi, Modelli e Tecnologie per l'Ingegneria
curriculum Ingegneria Civile e Ambientale

Ciclo XXXII

Analisi multilivello BIM per la valutazione della
vulnerabilità sismica degli edifici in muratura

SSD: ICAR/17 – ICAR/09

Coordinatore del Corso
Chiar.ma Prof.ssa Wilma Polini

Dottorando
Marco Saccucci

Supervisor
Chiar.ma Prof.ssa Maura Imbimbo
Chiar.ma Prof.ssa Assunta Pelliccio
Chiar.mo Prof. Ernesto Grande

*È possibile che tutto possa essere descritto scientificamente,
ma non avrebbe senso,
sarebbe come se descrivessimo una sinfonia di Beethoven
come una variazione nelle pressioni di onde.*

(Albert Einstein)

RINGRAZIAMENTI

...Marco, ce l'hai fatta!!!...

Furono queste le parole che ascoltai tre anni fa quando mi fu offerta la possibilità di avvicinarmi al mondo della ricerca.

...il dottorato. Io. Marco Saccucci...wow...si dice dottorando??? dottorato??? dottorabile???...

Mi sentivo così fortunato, motivato, carico e per certi versi privilegiato perché consapevole del fatto che durante il mio percorso avrei avuto la possibilità di migliorare le mie conoscenze, crescere professionalmente ma soprattutto di conoscere persone sicuramente più colte di me da cui poter solo trarre insegnamenti. E non nego la preoccupazione e il senso di timidezza che provavo verso qualcosa di cui non mi sentivo all'altezza.

E invece eccoci dopo questi tre anni. Sono volati troppo velocemente. Ma il tempo ha portato con sé tante soddisfazioni. Ma soprattutto ha confermato tutte le mie aspettative. Ho avuto la fortunata possibilità di studiare, imparare, migliorare e curiosare su tematiche che hanno indubbiamente incrementato il mio bagaglio culturale. Ma soprattutto ho conosciuto tantissime persone speciali. E sono proprio loro che voglio ringraziare al termine del mio percorso.

Un ringraziamento ai miei tutor universitari per aver creduto in me, per avermi insegnato e trasmesso la passione per la ricerca e per avermi stimolato sempre a dare il meglio. Voglio ringraziare con affetto la prof. Assunta Pelliccio, una vera *"madre accademica"*. Ricordo il primissimo esame che ho sostenuto all'università: Disegno. Ero agitatissimo. Feci la prova orale proprio con la professoressa Pelliccio. E ricordo vivamente la sensazione di tranquillità e serenità che mi seppe dare. L'esame andò molto bene. E da allora il mio punto di riferimento, ma mia guida è stata proprio lei. La ringrazio per avermi guidato quotidianamente durante tutto il percorso universitario, per avermi trasmesso il senso del dovere, per avermi ceduto tutto il suo sapere, per avermi apprezzato e stimato, per avermi fatto sentire importante e per avermi dato dei preziosi insegnamenti che mi hanno fatto crescere sia dal punto di vista professionale che umano. Attraverso i nostri dialoghi e i confronti mai banali ma anzi sempre costruttivi ho potuto coltivare e mettere a frutto anni di sacrifici e impegno rigoroso verso il sapere scientifico. Te ne sarò per sempre grato e spero di esser riuscito a renderti orgoglioso di me. Grazie. Voglio ringraziare la prof. Maura Imbimbo. Ho scoperto una donna forte, sicura, intraprendente ed allo stesso tempo dolce, paziente e umile. Un esempio virtuoso di *"docente"* capace di insegnare a cercare l'essenza delle cose e capace di trovare sempre il giusto modo per spronarmi. Farò tesoro del modo in cui abbiamo affrontato tutte le sfide proposte, i progetti, e non farò mai scemare la *"voglia di fare e fare bene"*. Voglio ringraziare il prof. Ernesto Grande, che nonostante i mille mila impegni è riuscito sempre a ritagliare del prezioso tempo da spendere gioiosamente con me. Un pozzo di scienza, di conoscenze e sapienza, ma anche una persona sempre di buon umore, solare, simpaticissima con cui ho speso momenti felici. Ma l'insegnamento più grande che mi ha potuto dare è stata la dedizione e il rigore verso la ricerca.

Ed ora tocca a tutti i miei colleghi dottorandi, ricercatori e professori dell'Università di Cassino. Quanto lavoro nell'aula dottorandi, quante risate nell'aula dottorandi, quante mangiate nell'aula dottorandi, quante chiacchierate nell'aula dottorandi, quanto tempo passato nell'aula bunker dottorandi. Buia, tetra, sporca, grigia. Eppure l'abbiamo reso il luogo più luminoso, ridente, pulito, colorato ed accogliente di tutta l'Università grazie alla nostra felicità. Grazie a tutti voi che mi avete reso piacevole il lavoro, che mi avete aiutato sempre! Grazie per avermi accettato volendomi un mondo di bene. Grazie per esservi presi di cura di me e di Errica quando fu nostra ospite. Siamo una squadra, o meglio un Governo, il Governo Canestrello. Grazie a Lorenzo (Lollo, LoSarchiapons) che è stato il primo individuo losco che mi ha accolto dal primo giorno che ho messo piede nel bunker. Amico fidato e sincero. Esploratore musicale. Riproduttore da gomito. Generatore di figlie bellissime! Un bel grazie a Erminio (Erminios, Mimmo). Non so se brilla di più la sua testa pelata o il suo sorriso! Sempre gentile, sempre altruista, sempre garbato, grande appassionato di legna e maiali, grande giocatore di calcio balilla, nemico di Babbo Natale della Geox. A Roberta (Bob). La persona più buona della terra! La persona più timida della terra! La persona più giocatrice di

ping pong della terra! La persona più attaccante del calcio balilla in squadra con me della terra! La persona più sperperatrice di non-soldi della terra! La persona più Giapponese della terra! La persona con le guance più rosse della terra! La persona più pura e leale che abbia mai conosciuto! Grazie. A Simone. Il genio assoluto. Il re delle cazzate. L'uomo dalla mandibola di ferro. Il cavallo. La roccia. Il multitasking. Il super-atleta. Il motivatore. Il trasciatore di folle. One-man-show. Il governatore/amministratore delegato. L'idraulico. Il Gargaroz. Grande Simone. Claudia. L'unico vero "uomo" dell'aula dottorandi. Moglie infedele, compagna traditrice, fidanzata infida. Ti confesso che ti ho tubato tutto il materiale di cancelleria! Che possa tu stendere sempre tappeti rossi al "Signor Conte"! Un grazie a Roseline Sparagna. Ventate di gioia, simpatia e francesismi a go go. Me somage a ta sor!!! An pò d'l'œ!!! Indimenticabile la storia della lavagna. Che è vera!!! Azzurra, vecchia strega maledetta! Unica conoscitrice della differenza tra "Mei co**ni" e "Sti ca**i"! Distruttrice di Fabio con calci micidiali. Fabbiouueee. Aglir, lataglir, psca, pscre, la cuc'tena, gl'om cacciò! Che soggetto. Troppo simpatico. Un grazie ad Enza (Enza Mlon) per la sua velocità! Un grazie a Luca, il Toro, successore diretto di Cavallo! Amministratore delegato dell'aula dottorandi. Una persona splendida, simpatica, dotta, ac-cul-turata, re del trash. Grazie Luca! A Riccardo (Nitifhler, Nitifissimo). Un caro vecchio amico fidato. Conosciuto nel lontano 2010 quando eravamo dei pargoli. Grazie per i consigli, le chiacchierate, le simpatie e la stima nei miei confronti. Un grazie a Francesca (Laiannacò TPC) per le ansie che mi hai provocato. Ma anche per il supporto reciproco che ci siamo dati (e per il supporto alla sola squadra!). Ti auguro il meglio TPC! Grazie a Daniela (Ao, Aodaniè, Daniè, Uagliò). Esempio di professionalità e serietà. Sempre disponibile, cordiale e gentile. È stato un onore poter lavorare con te. Grazie a Valentina (LaCima). Abbiamo lavorato spalla a spalla per molto tempo, una parte dei traguardi da me raggiunti è dovuto a te. Sempre in gamba. In bocca al lupo per tutto. A Deborah (deborah maceroni voto diesci) per la stima e l'affetto nei miei confronti. Ti ho accolto nell'università facendoti vincere l'imbarazzo che provavi, giustamente venendo da un paese molto lontano è normale. Ti auguro il meglio. A Anna (Ansia, Annabà) per avermi viziato a caramelle, per avermi strappato una marea di risate, per avermi insegnato la tua "grezzezza" e per avermi fatto lavorare anche il mese di agosto a 50°C. TPC anche a te. Ci tengo a ringraziare anche il prof. Giuseppe Modoni (SuperModons), persona speciale, il prof. Mauro D'Apuzzo, l'eleganza e l'ingordigia fatta persona, la prof. Magdalena Zmudzinska per la sua ospitalità in Polonia e tutti i professori di UNICAS con cui ho avuto modo di spendere del tempo insieme, prof. Erika Ottaviano, prof. Fausto Arpino, prof. Giuseppe Mascolo, prof. Maria Cristina Mascolo.

Ringrazio tutti i miei amici per avermi dato la carica giusta durante il mio percorso, di esservi presi cura di me e di avermi fatto staccare dalle attività quotidiane per divertirci, chiacchierare e spendere piacevole tempo insieme. Grazie a tutti. E grazie a te, caro Luca.

Sono grato a tutta la mia famiglia, in particolare a mia mamma, mio padre e Davide per aver sempre creduto in me ed incoraggiato a dare il meglio, supportandomi anche nel momento delle scelte difficili e facendomi sentire forte. Grazie per i sacrifici che avete fatto per permettermi di raggiungere questo risultato. Sarò per sempre riconoscente. E un grazie a tutta la famiglia di Errica. Mi avete adottato come se fossi stato da sempre presente nella vostra vita. Vi ringrazio per la stima che riponete nei miei confronti.

Sei arrivata fin qui a leggere è perché sei la persona che si prende cura di me. Sei colei che mi dà sicurezza. Sei colei che crede in me. Sei colei che vuole il meglio per me. Sei colei che mi incoraggia, mi supporta e sopporta. Sei colei con il quale ho deciso di passare il resto della mia vita. Fianco a fianco. Da marito e moglie, continuando ad amarci come abbiamo fatto per tutto questo tempo. È te che voglio ringraziare più di ogni altro perché solo grazie a te sono riuscito ad andare avanti nel mio percorso. Sacrifici, sforzi, difficoltà, ansie, dubbi, grazie a te sono diventati una cosa leggera. È a te che voglio dedicare questo lavoro. È per te, Errica.

Grazie a tutti.

Sinceramente,
Marco

*...and in the end the love you take
is equal to the love you make...*

[The Beatles, Abbey Road, 1969]

ABSTRACT

L'Italia è un paese caratterizzato da realtà urbane che presentano una morfologia estremamente eterogenea generata dallo sviluppo del tessuto in epoche storiche differenti. Spesso tali realtà sono caratterizzate da aggregati edilizi in muratura, frutto del risultato di processi non pianificati di sviluppo e dell'assemblaggio di edifici di età, materiali, tecniche di costruzione, dettagli costruttivi diversi i quali costituiscono l'ossatura dei centri storici minori. Data la loro posizione geografica nel contesto orografico italiano essi sono estremamente esposti al rischio sismico la cui mitigazione e riduzione costituisce un tema di particolare interesse. Negli ultimi anni proprio per questo motivo si sono sviluppate numerose tecniche e metodologie per la valutazione della sicurezza delle strutture esistenti, in particolar modo per gli edifici in muratura in modo da poter limitare gli esiti disastrosi dei terremoti in termini di perdite di patrimonio culturale ma soprattutto di vite umane. Per questo motivo la salvaguardia del tessuto urbano, ma in particolare dei centri storici, parte da un progetto di conoscenza teso ad evidenziare i principali fattori di vulnerabilità che contribuiscono alla valutazione del rischio a cui sono soggetti. Il processo di conoscenza, soprattutto nella fase di rilievo, è particolarmente complesso poiché richiede il management di dati estremamente eterogenei che vanno dall'unità edilizia all'aggregato strutturale e dall'intero nucleo urbano all'ambiente. I modelli di rappresentazione per la visualizzazione dei principali fenomeni di vulnerabilità forniscono un importante supporto per l'analisi della vulnerabilità strutturale per mezzo di procedure in grado di comprendere il comportamento degli edifici quando sono sollecitati sismicamente.

Con questa consapevolezza la presente ricerca ha come obiettivo la definizione di uno strumento integrato multilivello in grado di gestire, analizzare e rappresentare la molteplicità, eterogeneità e complessità dei dati necessari per la valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura costituenti i centri storici. Attraverso la conoscenza approfondita e l'uso dei sistemi di modellazione parametrica, come i *Building Information Modeling (BIM)*, è possibile determinare i più probabili cinematismi di collasso, sulla base di informazioni dedotte da un processo di conoscenza, e dunque di valutare i livelli di vulnerabilità sismica di ogni unità strutturale sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo.

Tale metodologia, testata su un caso di studio – Borgo San Rocco a Sora (FR) – consente altresì di evidenziare come le informazioni ottenute dalla sua applicazione siano di supporto nella gestione delle condizioni di emergenza. La procedura proposta è innovativa, poiché coniuga aspetti legati alla conoscenza della costruzione con differenti metodologie di analisi in modo razionale ed efficiente, organizzandoli e collegandoli a diversi livelli e stabilendo relazioni tra questi. Appare evidente come l'approccio utilizzato per l'analisi della vulnerabilità sismica della costruzione/aggregato sia strettamente correlato alle informazioni disponibili, riguardanti le proprietà geometriche e meccaniche, così come la storia e l'evoluzione dell'oggetto. A tale scopo, nella procedura proposta vengono definiti diversi livelli di indagine e analisi strutturale per arrivare alla valutazione della sicurezza sismica.

SOMMARIO

ABSTRACT.....	I
Lista delle Figure	V
Lista delle Tabelle.....	XI
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1. La “questione” dei centri storici in Italia.....	5
1.1 Inquadramento del problema.....	5
1.2 Evoluzione della definizione di centro storico	9
1.3 I centri storici nella legislazione italiana	16
1.4 I centri storici “minori” tra urbanistica e architettura.....	21
1.5 Un GIS per la mappatura dei centri storici minori nel territorio nazionale 24	
1.6 Bibliografia.....	29
CAPITOLO 2. Il rischio sismico in Italia	31
2.1 Il rischio sismico.....	31
2.2 Cenni di sismicità in Italia	31
2.3 Il rischio.....	38
2.3.1 La pericolosità sismica	38
2.3.2 La vulnerabilità sismica	40
2.3.3 L’esposizione	41
2.3.4 La previsione	43
2.3.5 La prevenzione	44
2.4 La rappresentazione della pericolosità sismica dei centri storici minori..	46
2.5 Bibliografia.....	48
CAPITOLO 3. Il rilievo e l’analisi sismica degli edifici in muratura.....	50
3.1 Motivazione della ricerca	50
3.2 Il comportamento sismico degli edifici in muratura.....	51
3.2.1 I meccanismi di collasso fuori piano.....	52
3.3 Il rilievo e l’analisi degli edifici in muratura: stato dell’arte.....	58
3.3.1 Il rilievo	58
3.3.2 Metodi empirici per la valutazione della vulnerabilità sismica	62

3.4	Bibliografia.....	77
CAPITOLO 4.	Un “algoritmo” per l’analisi multilivello BIM.....	82
4.1	Introduzione.....	82
4.2	Metodologia e fasi.....	85
4.2.1	Approccio di Livello 1: analisi qualitativa.....	85
4.2.2	Approccio di Livello 2: analisi quantitativa.....	100
4.3	Bibliografia.....	111
CAPITOLO 5.	Caso di studio: Borgo San Rocco a Sora (FR).....	114
5.1	Introduzione.....	114
5.2	Analisi qualitativa di primo livello.....	117
5.2.1	Inquadramento storico.....	117
5.2.2	Evoluzione storica-urbanistica.....	124
5.2.3	Il Borgo San Rocco.....	132
5.2.4	Il rilievo del Borgo.....	135
5.2.5	Elaborazione grafica CAD.....	148
5.2.6	Analisi strutturale (Algoritmo Saccucci-Grande).....	149
5.2.7	Visualizzazione dei risultati.....	151
5.3	Analisi quantitativa di secondo livello.....	152
5.3.1	Il rilievo strumentale.....	152
5.3.2	Elaborazione grafico/numerica BIM.....	156
5.3.3	Analisi delle caratteristiche meccaniche dei materiali.....	160
5.3.4	Analisi cinematica.....	166
5.3.5	Visualizzazione dei risultati.....	170
5.4	Confronto dei risultati.....	171
5.5	Bibliografia.....	175
CAPITOLO 6.	Le novità introdotte dalla procedura multilivello.....	176
6.1	Un’applicazione pratica della metodologia multilivello.....	176
6.2	L’integrazione della metodologia per la gestione dell’emergenza sismica	176
6.2.1	Analisi della condizione limite per l’emergenza.....	177
6.2.2	Analisi della CLE per il comune di Sora.....	183
6.3	L’integrazione della metodologia con i database nazionali sugli edifici	188
6.3.1	esistenti.....	188
6.4	Bibliografia.....	193
CONCLUSIONI	194
Bibliografia	197

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1-1 Centri storici italiani prima e dopo i recenti eventi sismici.....	22
Figura 1-2 Schematizzazione delle morfologie altimetriche e planimetriche più comuni dei centri storici minori.....	23
Figura 1-3 Elementi tipici che costituiscono l'architettura e la struttura dei centri storici.	24
Figura 1-4 HT_GIS: impostazione della base map.....	26
Figura 1-5 HT_GIS: densità abitativa.....	26
Figura 1-6 HT_GIS: database.....	27
Figura 1-7 HT_GIS: centroidi per i centri storici con $n_{ab}<5000$	27
Figura 1-8 HT_GIS: geolocalizzazione dei centri storici minori con $n_{ab}<5000$...	28
Figura 2-1 Terremoti avvenuti negli ultimi 30 giorni rilevati dalla rete USGS (fonte https://earthquake.usgs.gov – ottobre 2019).....	32
Figura 2-2 Mappa della sismicità in Italia 2000-2012.....	33
Figura 2-3 Mappa della sismicità storica in Italia tra 800 e 2004 (fonte: INGV). 34	
Figura 2-4 Mappa della sismicità recente in Italia tra 1981 e 2011 (fonte: INGV).....	36
Figura 2-5 Mappa di pericolosità sismica in Italia (fonte: INGV).....	37
Figura 2-6 Conseguenze di un sisma su un edificio in muratura.....	41
Figura 2-7 Effetti del terremoto di L'Aquila del 2009 sul tessuto urbano di Onna.....	42
Figura 2-8 Distribuzione dei centri storici minori italiani in relazione alla carta di pericolosità sismica.....	47
Figura 3-1 Meccanismi: a nel piano e b fuori piano.....	51
Figura 3-2 Ribaltamento semplice: a globale e b parziale.....	53
Figura 3-3 Esempi di meccanismi di ribaltamento semplice su edifici in muratura.....	53
Figura 3-4 Ribaltamento composto: a globale; b parziale; c del cantonale.....	54
Figura 3-5 Esempi di meccanismi di ribaltamento composto su edifici in muratura.....	54
Figura 3-6 Flessione verticale.....	55

Figura 3-7 Esempi di meccanismi di flessione verticale su edifici in muratura ...	56
Figura 3-8 Flessione orizzontale	56
Figura 3-9 Esempi di meccanismi di flessione orizzontale su edifici in muratura	57
Figura 3-10 Metodi di analisi della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti...	63
Figura 3-11 Classi di vulnerabilità della scala EMS-98	64
Figura 3-12 Esempio di curva di fragilità	65
Figura 3-13 Esempio di DPM	66
Figura 3-14 Scheda AeDES	69
Figura 3-15 Scheda GNDT (Formisano)	70
Figura 3-16 Classificazione RE.SIS.TO	72
Figura 3-17 Metodo FaMIVE	73
Figura 3-18 Modello di blocco rigido non resistenze a trazione.....	74
Figura 4-1 Schema semplificato del livello 1	83
Figura 4-2 Schema semplificato del livello 2	83
Figura 4-3 Flowchart della metodologia.....	85
Figura 4-4 Sintesi schematica dell'approccio qualitativo	86
Figura 4-5 Algoritmo di calcolo (1).....	90
Figura 4-6 Algoritmo di calcolo (2).....	91
Figura 4-7 Algoritmo: informazioni generali.....	92
Figura 4-8 Algoritmo: destinazione d'uso	92
Figura 4-9 Algoritmo: dati sul tessuto urbano	93
Figura 4-10 Algoritmo: caratteristiche geometriche della facciata.....	93
Figura 4-11 Algoritmo: caratteristiche geometriche delle bucatore	94
Figura 4-12 Algoritmo: caratteristiche geometriche della pianta	95
Figura 4-13 Algoritmo: caratteristiche strutturali	96
Figura 4-14 Meccanismi di collasso fuori piano: A ribaltamento semplice globale; B ribaltamento semplice parziale; C ribaltamento del cantonale; D ribaltamento lungo le aperture; E ribaltamento di flessione verticale; F ribaltamento di flessione orizzontale; G ribaltamento del timpano.....	98
Figura 4-15 Algoritmo: meccanismo di collasso	98
Figura 4-16 Visualizzazione dei cinatismi	99
Figura 4-17 Sintesi schematica dell'approccio quantitativo	100
Figura 4-18 Matrice decisionale	110
Figura 5-1 Inquadramento geografico del centro storico di Sora	114
Figura 5-2 Foto-inserimento di Borgo San Rocco e sezioni dell'aggregato strutturale	115

Figura 5-3 Intensità macrosismiche degli eventi sismici storici risentiti a Sora (DBMI15)	116
Figura 5-4 Sistema di gestione dell'emergenza del Comune di Sora	116
Figura 5-5 Vista aerea del centro storico di Sora ed ubicazione di Borgo San Rocco	117
Figura 5-6 Piccolo frammento di corno con una serie di incisioni lineari parallele	118
Figura 5-7 Resti delle mura poligonali presenti su Monte San Casto.....	118
Figura 5-8 Mura in opera poligonale	119
Figura 5-9 La basilica di San Domenico a Sora.....	120
Figura 5-10 Arcata del ponte Marmone	121
Figura 5-11 Provincia di Terra di Lavoro	122
Figura 5-12 Intersezione decumani e cardì	126
Figura 5-13 Impianto ippodameo del centro storico di Sora	126
Figura 5-14 Impianto a fuso e presenza della cinta muraria medievale nel centro storico di Sora	127
Figura 5-15 Impianto a pettine di epoca medievale del centro storico di Sora... ..	128
Figura 5-16 Sezione piena in associazione con paramenti in materiale non lavorato o spaccato.....	129
Figura 5-17 Impianto periodo rinascimentale e inizi '800 del centro storico di Sora	129
Figura 5-18 Carta catastale del 1876.....	130
Figura 5-19 Carta presente all'ufficio tecnico del comune di Sora	130
Figura 5-20 Carta catastale del 1926 e carta catastale del 1939	131
Figura 5-21 Dipinto di F. Vanni (1565-1610).....	132
Figura 5-22 Altorilievo in stucco del XVII secolo	133
Figura 5-23 Litografia tratta dall'opera di G. B. Pacichelli	133
Figura 5-24 Foglio catastale del centro storico di Sora. 1700 ca.....	134
Figura 5-25 Foglio Catastale del centro storico di Sora. 1876.....	135
Figura 5-26 Arco di San Rocco a Sora	136
Figura 5-27 Testata del documento di archivio "Rilievo e progetto di interventi di riattazione e adeguamento igienico- funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 di Borgo San Rocco"	137
Figura 5-28 Piante, prospetti e sezioni di archivio.....	137
Figura 5-29 Individuazione delle US ed attribuzione del codice identificativo..	138
Figura 5-30 Borgo San Rocco: altezze	139

Figura 5-31 Borgo San Rocco: lunghezze del fronte	140
Figura 5-32 Arco di interconnessione	141
Figura 5-33 Schema di arco policentrico a sesto ribassato	141
Figura 5-34 Borgo San Rocco: regolarità degli orizzontamenti	143
Figura 5-35 Borgo San Rocco: sistema di bucatore.....	144
Figura 5-36 Borgo San Rocco: rinforzi strutturali	145
Figura 5-37 Borgo San Rocco: strutture verticali	146
Figura 5-38 Sistema di orizzontamenti eterogeneo.....	146
Figura 5-39 Modello 3D del Comparto A.....	148
Figura 5-40 Modello 3D del Comparto B	148
Figura 5-41 Foglio Excel® per la definizione dei meccanismi di collasso	149
Figura 5-42 Approccio qualitativo – Meccanismi individuati per le US, in cui si è indicato con: RG il meccanismo di ribaltamento semplice globale, RP il meccanismo di ribaltamento semplice parziale, RC il meccanismo di ribaltamento del cantonale, RA il meccanismo di ribaltamento lungo le aperture, FV il meccanismo di flessione verticale, FO il meccanismo di flessione orizzontale e RT il meccanismo di ribaltamento del timpano	151
Figura 5-43 Drone professionale DJI Phantom 3 Advanced	152
Figura 5-44 Direzione delle strisciate fotografiche eseguite da drone.....	153
Figura 5-45 Borgo San Rocco. Visualizzazione ed edit della nuvola di punti ...	154
Figura 5-46 Borgo S. Rocco. Navigazione ed interrogazione della nuvola di punti all'interno del software Recap: a) analisi dell'ortogonalità dei piani; b) individuazione delle fasce di elevazione.	155
Figura 5-47 Integrazione del modello parametrico 3D alla nuvola di punti del rilievo fotogrammetrico digitale.....	156
Figura 5-48 Individuazione dei livelli all'interno della nuvola di punti per la costruzione del modello parametrico 3D	157
Figura 5-49 Modello parametrico di dettaglio delle unità strutturali realizzato con Autodesk Revit	158
Figura 5-50 Modello BIM architettonico e strutturale.....	158
Figura 5-51 Scheda informativa di un oggetto BIM	159
Figura 5-52 Esploso di un singolo oggetto BIM.....	159
Figura 5-53 Frammento di lapideo costituente la muratura del Borgo San Rocco	160
Figura 5-54 Bilancia utilizzata per effettuare le varie pesate.....	160
Figura 5-55 Stufa termostatica	161

Figura 5-56 Bilancia idrostatica a) misurazione peso impregnato b) misurazione peso immerse	162
Figura 5-57 Prodotto della reazione chimica avvenuta tra acido cloridrico e carbonato di calcio	163
Figura 5-58 Determinazione della Legge di Bragg usando la geometria della riflessione ed applicando la trigonometria.....	164
Figura 5-59 Campione di pietra da analizzare ridotto in polvere.....	164
Figura 5-60 Pattern di diffrazione mediante raggi X del lapideo	165
Figura 5-61 Parametri meccanici della muratura dalla tabella C8.5.I della circolare 2019	165
Figura 5-62 Edificio 10B: a foto della facciata; b schema della parete per il meccanismo di ribaltamento globale	167
Figura 5-63 Confronto fra capacità e domanda: a comparto A, b comparto B .	169
Figura 5-64 Risultati dell'analisi cinematica lineare in termini di accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0	170
Figura 5-65 Risultati della verifica semplificata con fattore di struttura q allo SLV	171
Figura 5-66 Esiti della verifica dell'approccio quantitativo	172
Figura 5-67 Esiti della verifica dell'approccio qualitativo	173
Figura 5-68 Individuazione degli edifici vulnerabili secondo l'approccio qualitativo	174
Figura 5-69 Individuazione degli edifici vulnerabili secondo l'approccio quantitativo alla luce dei risultati dell'approccio qualitativo.....	174
Figura 6-1 Diagramma danno – intensità per l'individuazione delle condizioni limite	177
Figura 6-2 Condizione di interferenza su infrastrutture di accesso/connesione	182
Figura 6-3 Aggregati strutturali e unità strutturali interferenti con infrastrutture e aree di emergenza	182
Figura 6-4 Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza del comune di Sora	183
Figura 6-5 Stralcio dell'elaborazione del Piano di Protezione Civile di Sora	184
Figura 6-6 Visualizzazione dell'interferenza con la metodologia proposta dalla CLE	185
Figura 6-7 Confronto dei risultati tra il metodo CLE e l'algoritmo.....	186
Figura 6-8 Visualizzazione dell'interferenza con la metodologia proposta dall'algoritmo.....	187

Figura 6-9 Stralcio della scheda CARTIS edificio	190
Figura 6-10 Elementi presenti nella scheda CARTIS edificio per il funzionamento dell'algoritmo.....	191
Figura 6-11 Database e schede informative associate alle US di Borgo San Rocco	192

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1-1 Fasce demografiche di interesse per i comuni italiani.....	25
Tabella 1-2 Fasce demografiche di interesse per i comuni italiani.....	25
Tabella 4-1 Parametri per il funzionamento dell'algoritmo.....	88
Tabella 4-2 Tipologia di muratura	97
Tabella 5-1 Esiti dei risultati.....	150
Tabella 5-2 Estratto del file di testo .txt della nuvola di punti.....	154
Tabella 5-3 Dati di input per l'analisi cinematica dell'US 10B.....	168

INTRODUZIONE

Dopo gli ultimi eventi sismici che hanno interessato i comuni dell'Italia centrale, si è riaperto con vigore il dibattito sulla salvaguardia dei centri storici minori che, per l'originalità della loro composizione urbana, sono considerati dei monumenti d'ambiente da tutelare e preservare. Essi, data la loro posizione geografica nel caratteristico contesto orografico italiano, sono estremamente esposti al rischio sismico la cui mitigazione e riduzione costituisce un tema di particolare interesse. In passato la prevenzione sismica era affidata quasi esclusivamente alla memoria storica dell'uomo che tramandava, di generazione in generazione, le lezioni che il terremoto impartiva attraverso il numero delle vittime da esso causate e le quantità di danni inferti alle costruzioni. Erano lezioni che riguardavano la migliore localizzazione delle costruzioni, il modo di erigerle perché potessero resistere alle azioni indotte dal sisma, l'uso di buoni materiali e di particolari accorgimenti costruttivi. Purtroppo la memoria dei terremoti si affievoliva nel tempo e le lezioni da essi impartite erano dimenticate dopo due o tre generazioni: di conseguenza, progressivamente, si abbandonavano quelle precauzioni ed attenzioni nel costruire atte a ridurre gli effetti di tali eventi. Negli ultimi anni proprio per questo motivo sono state sviluppate numerose tecniche e metodologie per la costruzione di nuovi edifici ma soprattutto per la valutazione della sicurezza delle strutture esistenti, in particolar modo per gli edifici in muratura in modo da poter limitare gli esiti disastrosi dei terremoti in termini di perdite di patrimonio culturale, ma soprattutto di vite umane.

Per questo motivo la salvaguardia del tessuto urbano, ma in particolare dei centri storici parte da un progetto di conoscenza teso ad evidenziare i principali fattori di vulnerabilità che contribuiscono alla valutazione del rischio a cui sono soggetti. Queste realtà devono essere pensate non come la somma di singoli fenomeni architettonici ma nella totalità e complessità del loro fenomeno urbano. Il processo di conoscenza, soprattutto nella fase del rilievo, è particolarmente complesso poiché richiede un management di dati molto eterogenei che va dall'unità edilizia all'aggregato strutturale e dall'intero nucleo urbano all'ambiente. La rappresentazione gioca un ruolo fondamentale in questo dibattito: modellare e visualizzare i principali fenomeni di vulnerabilità del patrimonio culturale è senza dubbio il primo passo nella riduzione del

rischio a cui esso è soggetto. I modelli di rappresentazione sono, inoltre, un importante supporto per l'analisi della vulnerabilità strutturale. Proprio per tale motivo nel corso degli anni sono state messe a punto numerose procedure per comprendere il comportamento di questi edifici quando sono sollecitati sismicamente. Queste procedure, pensate nella maggior parte dei casi in seguito ad eventi sismici significativi, forniscono una conoscenza generale sull'intero nucleo urbano definendo livelli di vulnerabilità. Parallelamente la normativa sismica, introdotta in Italia sin dal 1984, indica una serie di analisi in grado di fornire alcune informazioni sul comportamento sismico degli edifici in muratura articolate in modo complesso e di non facile esecuzione.

Da qui nasce la necessità di pianificare e gestire questi aspetti per lungo tempo trascurati. Infatti, non ci si è quasi mai preoccupati di quello che potrebbe accadere nel caso in cui si verificasse un evento importante ma si è sempre considerato il problema a fenomeno avvenuto, scemando poi negli anni a venire, nell'attesa di un nuovo terremoto. Negli ultimi anni però il concetto di *città resiliente* si è inserito sempre più prepotentemente nella società, di conseguenza gli stati hanno deciso di promuovere ed attuare dei piani in grado di ridurre e gestire le perdite e preparare la popolazione agli eventi catastrofici attraverso analisi preventive che forniscano una valutazione dei rischi in modo da stimare gli effetti prodotti da un sisma. Tutto ciò non è di semplice attuazione, in quanto non si tratta più di indagare il singolo edificio, ma di contestualizzarlo con l'ambiente circostante in una scala molto più ampia, considerando l'intero territorio con le complesse relazioni che lo caratterizzano.

Con questa consapevolezza la presente ricerca ha come obiettivo la definizione di uno strumento integrato multilivello in grado di gestire, analizzare e rappresentare la molteplicità, eterogeneità e complessità dei dati necessari per la definizione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura costituenti i centri storici. Attraverso la conoscenza approfondita e l'uso di sistemi di modellazione parametrica (grafico/numerica), come i *Building Information Modeling* (BIM), è possibile determinare i più probabili cinematismi di collasso, sulla base di informazioni dedotte da un processo di conoscenza, e dunque di valutare i livelli di vulnerabilità sismica di ogni unità strutturale sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Tale metodologia, testata su un caso di studio, consente altresì di evidenziare come le informazioni ottenute dalla sua applicazione siano di supporto nella gestione delle condizioni di emergenza. La procedura proposta è innovativa, poiché coniuga aspetti legati alla conoscenza della costruzione con differenti metodologie di analisi in modo razionale ed efficiente, organizzandoli e collegandoli a diversi livelli e stabilendo

relazioni tra questi. Appare evidente come l'approccio utilizzato per l'analisi di vulnerabilità sismica della costruzione/aggregato sia strettamente correlato alle informazioni disponibili, riguardanti le proprietà geometriche e meccaniche, così come la storia e l'evoluzione dell'oggetto. A tale scopo, nella procedura proposta vengono definiti diversi livelli di indagine e analisi strutturale per arrivare alla valutazione della sicurezza sismica.

Nei capitoli successivi viene mostrata la procedura di analisi multilivello per la valutazione della vulnerabilità sismica dei centri storici che possa essere un punto di inizio per successive migliorie e che possa fornire spunti utili per proporre piani in grado di gestire e ridurre i danni causati dai fenomeni sismici.

Nel **Capitolo 1 - La “questione” dei centri storici in Italia** viene inquadrato il problema della gestione e tutela dei centri storici in termini sia sociali che architettonici/urbanistici. Vengono infatti analizzate le principali linee di pensiero sul tema della conservazione dei centri storici, con particolare riferimento alle definizioni che gli sono state attribuite nel tempo e alla loro considerazione nella legislazione italiana. Si introduce inoltre la relazione che intercorre tra l'urbanistica e l'architettura di tali realtà in modo da poter quantificare e geolocalizzare la dimensione del problema.

Nel **Capitolo 2 - Il rischio sismico in Italia** sono descritte le componenti del rischio sismico dal punto di vista bibliografico (la pericolosità sismica, la vulnerabilità sismica e l'esposizione sismica) indispensabili per la mitigazione e riduzione degli eventi tellurici attraverso programmi di previsione e prevenzione dei terremoti. Obiettivo è quello di introdurre il problema del rischio a cui sono soggetti i centri storici minori che costituiscono l'ossatura portante dei comuni italiani.

Nel **Capitolo 3 - Il rilievo e l'analisi sismica degli edifici in muratura** vengono descritti i principali strumenti di analisi e conoscenza degli edifici in muratura per la definizione della vulnerabilità. Attraverso una lettura critica dei riferimenti bibliografici in materia di rilievo e di analisi strutturale sismica è possibile determinare i pregi e le virtù dei metodi analizzati utili allo sviluppo della metodologia posta come obiettivo della ricerca.

Nel **Capitolo 4 - Un “algoritmo” per l'analisi multilivello BIM** viene proposta una metodologia innovativa multilivello basata su un algoritmo appositamente sviluppato per l'identificazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura dal punto di vista dei meccanismi locali di collasso fuori piano sia in termini qualitativi che in termini quantitativi. Vengono indicate quindi le procedure di conoscenza/rilievo

dei manufatti e gli approcci di analisi da utilizzare, nonché i sistemi per la visualizzazione dei risultati ottenuti.

Nel **Capitolo 5 - Caso di studio: Borgo San Rocco a Sora (FR)** viene applicata la metodologia proposta ad un caso di studio reale: il Borgo San Rocco di Sora in provincia di Frosinone. L'attenzione è posta all'esecuzione dei due approcci indicati dalla metodologia: il primo di tipo qualitativo e il secondo di tipo quantitativo. In primo luogo vengono eseguiti i rilievi. Successivamente vengono adoperati gli algoritmi per l'indagine, quindi visualizzati i risultati ottenuti in termini di vulnerabilità sui modelli grafici tridimensionali per renderne facile la lettura, anche a utenti e persone non specializzate.

Nel **Capitolo 6 - Le novità introdotte dalla procedura multilivello** vengono esplicitate le principali ricadute applicative della metodologia e le possibilità di integrazione della analisi con procedure già consolidate. In particolare l'approccio multilivello risulta essere estremamente utile per definire i Piani di Protezione Civile della città e per l'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza. Inoltre è possibile integrare i dati dei numerosi database nazionali sugli edifici ordinari (es. CARTIS) con le procedure di analisi proposte per la definizione della vulnerabilità sismica.

CAPITOLO 1.

LA “QUESTIONE” DEI CENTRI STORICI IN ITALIA

1.1 Inquadramento del problema

La questione della gestione centri storici rappresenta uno dei punti cardine del dibattito culturale e urbanistico. Essi costituiscono un ingente patrimonio culturale della nazione, caratterizzati da un'elevata qualità della vita aggregativa e da una significativa identità estetica del tessuto urbano, derivante dall' incisivo rapporto empatico con l'ambiente naturale (caratteristiche morfologiche/ubicazionali, materiche/tecnologiche). La bellezza di questi luoghi è data dalla loro composizione urbana che seguendo l'orografia del territorio si inserisce rispettosa nell'ambiente circostante con semplici architetture, realizzate con materiali locali, che oggi definiremmo “sostenibili” (Pelliccio, 2016).

La pianificazione e la gestione dell'insieme di trasformazioni agenti nei nuclei antichi delle nostre città è un problema complesso e la sfida più impegnativa è proprio riuscire a governare tale complessità. Nelle politiche urbane tese a riqualificare il patrimonio storico e, contemporaneamente, ad avviare un rilancio dell'immagine della città, appaiono sempre più delicati gli equilibri tra conservazione dell'identità dei luoghi e uso distorto degli stessi.

Le interpretazioni e le soluzioni proposte per la loro preservazione di volta in volta sono state sintomatiche del cambiamento dell'idea di città nel corso degli anni, e di tutte le relazioni sociali e storiche ad essa connesse, le quali hanno caratterizzato le teorie e le pratiche urbanistiche di intervento e di trasformazioni della città stessa.

Di riflesso vi è stata una evoluzione della legislazione e degli strumenti urbanistici relativi ai centri storici. Per troppo tempo la politica del "vincolismo" e dell'"incommensurabile" valore, ha determinato lo stato di abbandono e di degrado in cui versano i nostri centri storici.

Ora il centro storico non è più un "monumento" intoccabile. Oggi il tema del riuso, della tutela e del ripristino delle funzioni è questione fondamentale nei processi urbani.

In quest'ottica il dibattito sulla salvaguardia dei centri storici minori è tornato ad essere preponderante negli ultimi anni a seguito dei terremoti che hanno interessato le regioni del centro Italia. Per l'originalità della loro composizione urbana sono considerati dei monumenti d'ambiente da tutelare e preservare: la perdita del *genius loci* espressione di quelle piccole comunità significherebbe la perdita dell'identità culturale dell'intera nazione.

Il tema dei centri storici, soprattutto da un punto di vista urbanistico, ha un consistente retroterra bibliografico. La strategia attraverso cui introdurre la questione permette di identificare le principali tendenze degli ultimi anni nelle principali tematiche relative al tema dei centri storici in Italia.

Risulta interessante considerare gli ultimi quarant'anni, in quanto rilevanti e fortemente eterogenei da un punto di vista dei profili di intervento nei centri storici. Gli anni Settanta hanno indubbiamente contribuito a dare una svolta alla questione dei centri storici, in particolare relativamente al problema dell'utilizzazione del patrimonio edilizio a seguito della crisi economica degli anni Settanta, crisi che ha colpito in particolare il settore delle costruzioni. La pressione sociale maturata intorno al "problema della casa" da un lato, e dall'altro le trasformazioni della struttura produttiva ha spinto verso una inevitabile diminuzione dei prezzi; in questo periodo le prospettive di edilizia convenzionata, cioè a prezzo controllato, si sono consolidate. Il conflitto si è esteso presto anche al settore del rinnovo, soprattutto laddove esso sembrava offrire sbocchi produttivi di dimensione consistente. L'aumento della domanda di alloggi usati è spiegabile attraverso il calo complessivo della produzione e l'aumento dei prezzi che ha spinto la domanda verso l'usato, offerto ancora nel 1972-73 a prezzi inferiori di circa il 40% rispetto al nuovo.

Gli anni '70 si sono configurati quindi come gli anni della "riscoperta del patrimonio edilizio esistente"; a questa fase, che si può identificare con la generalizzazione della consapevolezza dello "spreco edilizio", spetta storicamente il merito di aver contribuito ad arrestare la politica di incondizionato sostegno alla produzione di case nuove. È negli anni '70 che il concetto di "riuso" viene associato alla copertura del fabbisogno abitativo (Ciardini & Falini, 1978).

Gli anni '80 sono stati contrassegnati dal tema del riuso e dal rapporto tra gli strumenti di pianificazione e gli strumenti operativi, legando le questioni del riuso alle questioni relative alle problematiche abitative e alle politiche edilizie. Le questioni relative al riuso e alla riqualificazione edilizia negli anni '80 sono state impostate

secondo una logica differente: si è tentato di trovare una soluzione al problema del “rinvio” nei P.R.G. del problema del centro storico ad un unico strumento esecutivo articolando, attraverso una “Variante di approfondimento”, gli strumenti operativi per il riuso. Tale strumento ha applicazione nella Variante per il Centro Storico al P.R.G. di Taggia.

È della fine degli anni '80 dove le questioni relative al riuso vengono associate anche alle questioni relative alla riqualificazione e al recupero della qualità insediativa nella città esistente, colta nel complesso dei suoi nuovi problemi. Durante questo periodo si assiste ad una sostanziale evoluzione nel modo di affrontare ed identificare la “questione” dei centri storici. La nuova priorità è vista come un'evoluzione delle esperienze precedenti e si configura come un cambiamento culturale complessivo che però riguarda in ogni caso le nozioni originarie di “centro storico”, “conservazione” “recupero” e “riuso”.

A partire dagli anni '90 l'approccio alla trattazione dei centri storici si è improntato non più sul recupero della città storica bensì sul recupero della città esistente: il punto di vista si è spostato quindi da un'ottica di conservazione del manufatto storico (inteso come monumento) ad una visione riguardante tutta la città, complessivamente, ad un progetto di recupero complessivo allo scopo di poter far dialogare senza più divisioni le parti storiche di città con quelle più recenti. In questo frangente, viene anche per la prima volta proposto un inventario dei centri storici in Italia. Carlo Gasparriani “L'attualità dell'urbanistica – Dal piano al progetto, dal progetto al piano”.

Negli ultimi anni la trattazione del problema dei centri storici ha subito un cambiamento nella linea. Il tentativo di preservare questi piccoli centri, anche attraverso leggi dello Stato con interventi di carattere nazionale rende il tema indubbiamente centrale. Nel merito, le possibili misure in grado di fornire risposte adeguate ai punti critici più significativi possono essere così riassunte:

- incentivi fiscali ed economici per chi risiede nei piccoli comuni e per chi intende trasferirvi la propria residenza, scongiurando l'abbandono e cercando di riportare le fasce di popolazione più giovane nei piccoli centri;
- riconoscere la specificità delle esigenze di quanti vivono e lavorano in comuni di piccola dimensione;
- promozione delle peculiarità del territorio
- affermazione del concetto di rete, necessario trattandosi di soggetti territoriali caratterizzati potenzialmente da un ridotto grado di autonomia;

- esigenza del mantenimento e del potenziamento di un livello di servizi tale da rendere non solo possibile, ma anche favorevole vivere in questi piccoli centri e godere dei vantaggi che essi garantiscono ad esempio sotto il punto di vista ambientale, sociale, culturale.

Gli indirizzi di carattere generale evidenziati concorrono alla valorizzazione dei centri storici minori, valorizzazione che si esplica tipicamente attraverso lo sviluppo turistico che si fonda non esclusivamente sul patrimonio storico ma anche sui valori ambientali e paesaggistici all'interno del quale i centri storici o i gruppi di centri storici si collocano.

Questi ultimi sono connessi anche alle possibili trasformazioni dell'attività agricola che, con la riforma della Politica agricola della UE, ha introdotto novità importanti rispetto all'uso e alla gestione del territorio agricolo da parte delle aziende. In questo caso, quindi, il problema da risolvere, quando i centri non siano già organizzati, è quello di cercare di ridurre lo spopolamento, non solo attraverso la promozione di attività turistiche, ma anche la produzione di servizi alla popolazione, la creazione di posti di lavoro, la promozione di una “moderna” vivibilità (legata anche alle questioni della mobilità e dell'accessibilità).

In questo quadro i percorsi di valorizzazione intrapresi o in divenire sono innumerevoli; la questione fondamentale in queste operazioni è indubbiamente l'integrazione, tra politiche, attori e finanziamenti, cosa che non sempre è facile raggiungere proprio perché gli interessi e le problematiche in gioco sono complesse e collocati a piani istituzionali diversi. In una logica corretta il processo di valorizzazione prima di arrivare al progetto parte da una conoscenza/interpretazione del territorio; è la relazione diretta con il territorio la base da cui far partire e su cui far ricadere il progetto finale. Sono numerose le esperienze considerabili “banali” in merito alla valorizzazione come ad esempio: la rete dei sentieri, gli itinerari enogastronomici, il borgo-museo. L'approccio in questo senso deve essere maggiormente legato all'unicità del luogo e di conseguenza l'intervento dovrà agire basandosi sulle peculiarità del territorio. Inoltre l'utilizzo di risorse locali già presenti nel territorio, di professionalità potenzialmente attivabili e sfruttabili possono essere un ottimo punto di partenza dal quale configurare un possibile percorso progettuale il più aderente al luogo di intervento.

Una delle problematiche principali da affrontare con un progetto di valorizzazione dei centri storici minori riguarda indubbiamente quello di invertire la tendenza dei fenomeni di spopolamento, l'obiettivo è quindi quello di creare delle condizioni favorevoli allo sviluppo o all'incremento di attività economiche, nuove o preesistenti,

dotando di conseguenza gli ambiti delle relative dotazioni e dei servizi necessari per la collettività; la dotazione e l'offerta di servizi è uno dei primi elementi con cui una amministrazione locale deve confrontarsi, assicurandone un buon livello per tutti i cittadini. In stretta relazione con la dotazione di servizi, fondamentale, nei processi di valorizzazione è l'identità. L'identità è fondamentale sia per una città piccola che per una città grande, in quanto è il legame indissolubile che esiste tra gli oggetti fisici che compongono la città con la sua storia, la sua cultura, il suo territorio, le sue tradizioni ed in particolare i suoi abitanti; vi è un rapporto preferenziale tra gli abitanti e il luogo in cui vivono, di conseguenza gli interventi sul territorio possono essere considerati invasivi o di “rottura” rispetto ad un ordine precedente. Sta nell'abilità e nella capacità di utilizzare le risorse presenti sul territorio (compresi gli abitanti) allo scopo di attutire e accompagnare il più possibile gli impatti nei casi di interventi di valorizzazione e/o ristrutturazione. Il rischio infatti è che, basandosi troppo su politiche di settore, come ad esempio la promozione turistica e commerciale, vi sia una progressiva perdita di identità del luogo, snaturandone l'identità e mettendo al margine le comunità locali.

1.2 Evoluzione della definizione di centro storico

Cercare di proporre una definizione di centro storico è oggi un'operazione estremamente difficile per la struttura sintetica che dovrebbe avere la proposizione riuscendo, nonostante la sua brevità, a racchiudere in sé almeno dei riferimenti a molteplici fenomeni complessi, e per l'abbondanza di varietà tipologica, strutturale, storica, dimensionale, geografica e geologica degli stessi.

La necessità ed al tempo stesso la difficoltà di una definizione è spesso generata dalla consapevolezza che non si può “identificare e comporre una categoria concettuale unitaria in cui far rientrare i vari tipi di agglomerati urbani di antica edificazione e/o di elementi interni di essi, dei quali il nostro paese presenta una fenomenologia particolarmente ricca” (D'Alessio, 1983).

Il concetto di centro storico ha subito un'evoluzione negli anni che è consistita in un allargamento graduale della sua individuazione fisica, nonché del suo significato: da semplice realtà urbanistico-architettonica con qualità culturale è andato ad includere aspetti anche sociali ed economici.

Si intende allora analizzare alcune definizioni per porre in luce da un lato la complessità del tema, e dall'altro tutti gli elementi, le discipline e le problematiche di cui è fondamentale tener conto nel momento in cui si vuole affrontare un discorso sui centri storici.

La storia dell'urbanistica fa solitamente partire lo studio dei centri storici dalla seconda metà dell'Ottocento, cioè da quel momento di svolta segnato dall'attività di *Haussmann* a Parigi.

In questo campo di studio si assiste alla presenza di due tendenze: una che colloca i centri storici all'interno della materia dei beni culturali ed un'altra che li pone nell'ambito della gestione complessiva del territorio.

In Italia, in ritardo rispetto ad altri paesi europei, inizia a nascere una nuova attenzione verso i centri storici soltanto nel 1960 in occasione del Convegno di Gubbio organizzato dall'I.N.U. (Istituto Nazionale di Urbanistica) sul tema “*Salvaguardia e risanamento dei centri storico – artistici*”.

Pur non essendo presente nella Carta di Gubbio (contenente i lavori, le proposte e le conclusioni del convegno) una definizione ufficiale di centro storico, si afferma sin dalla relazione introduttiva tenuta da Cederna e Manieri Elia, che “*la tutela e la salvaguardia debbano essere estese a tutta la città storica, tutto l'insieme della sua struttura urbanistica, quale si è venuta lentamente componendo nei secoli*”.

Il Convegno genera senza dubbio una svolta culturale, come testimoniato dal successivo proliferare di leggi speciali, proposte di legge, dibattiti e progetti inerenti i centri storici. Particolare attenzione e interesse vanno dati all'ottica di interventi generalizzati di salvaguardia dei centri storici, intesi come un *unicum* e non come insieme di monumenti.

È in questo clima culturale che viene fornita la prima definizione ufficiale di centro storico: nel 1964 la Commissione d'indagine per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico, artistico e del paesaggio (detta Commissione Franceschini dal nome del suo presidente), dopo aver dato per la prima volta la definizione di “Beni culturali ambientali” nella dichiarazione XXXIX, definisce i centri storici urbani come “*quelle strutture insediative urbane che costituiscono unità culturale o la parte originaria e autentica di insediamenti, e testimoniano i caratteri di una viva cultura urbana...*”.

Il centro storico viene dunque inquadrato e classificato fra i beni culturali, anche se non si deve confondere il bene-centro storico con altri inseriti nella stessa categoria, quali opere figurative, archivi e manoscritti (Franceschini, 1967).

Nella dichiarazione del '64 sono definite delle indicazioni sulla loro tutela che si dovrà attuare mediante misure cautelari ed attraverso i piani regolatori che “dovranno avere riguardo ai centri medesimi nella loro interezza” ed allo stesso tempo rivitalizzarli “garantendo loro ragioni di vita economica e sociale, che consentano lo svolgimento di una vita associata non depressa” (D'Alessio, 1983).

Nel 1969 la definizione di centro storico viene inserita nel Dizionario Enciclopedico di Architettura e urbanistica, *“Nucleo di una città che costituisca per caratteristiche formali, tipologiche e urbanistiche un complesso legato a particolari momenti storici. A volte il concetto di centro storico è esteso all’intera città, quando esso rappresenta una testimonianza viva di altre epoche. Il termine è stato diffuso dalla più recente legislazione urbanistica, la quale si è occupata del problema della conservazione, risanamento e valorizzazione del centro storico”*. I centri storici *“possono essere unitari o frammentari, completamente o parzialmente frammentari, completamente o parzialmente conservati nella loro originaria strutturazione; la loro delimitazione topografica...dovrà comprendere l’intera struttura urbana, quando si tratti di insediamenti in cui la struttura storica sia prevalente, anche quando questa abbia subito nel tempo palesi deformazioni che hanno rotto la continuità del territorio storico...possono rientrare nella tutela dei centri storici anche costruzioni relativamente recenti (sec. XIX) o addirittura moderne, se ritenute documenti decisivi ed unici nella storia dell’architettura”* (Portoghesi, 1968). In essa si apprezza in particolare, oltre il rispetto per le diverse stratificazioni ed il breve riferimento all’estrema varietà tipologica, l’ipotesi di estensibilità del centro storico all’intera città riprendendo la definizione introdotta nel 1965 da Roberto Pane il quale, distinguendo tra centro antico e centro storico scrive:

«...il *centro antico* corrisponde all’ambito della stratificazione archeologica, mentre il *centro storico* è la città stessa nel suo insieme, ivi compresi i suoi agglomerati moderni. In altre parole ciò che è antico è storico ma non tutto ciò che è storico è antico. Il concetto di antico esclude il nuovo ed il moderno e definisce il nucleo primitivo, dalle origini...includendo, ovviamente, le strutture e le forme medioevali, rinascimentali, barocche e ottocentesche che sono state configurate dalle successive stratificazioni» (Pane, 1965)

Le definizioni, sempre più elaborate, iniziano a contenere riferimenti a vari parametri: Di Gioia afferma che può essere qualificato come centro storico *“un luogo più o meno configurabile entro un perimetro, nel quale tradizionalmente la cittadinanza ha svolto (e continua a svolgere) le attività principali, e si sono quindi consolidate da tempo le sedi più rappresentative per tali funzioni...”* e soprattutto precisa che *“la nozione di centro storico tende oggi ad allargarsi ulteriormente, per applicarsi a tutti i contesti insediativi aventi valore di testimonianza storica, a qualunque epoca appartengano...Centro storico non è soltanto il centro antico di una città...l’espressione di centro storico è assunta a significare tutti quei valori urbanistici, di ambiente architettonico e d’arte, che si intendono oggi tutelare: ivi*

compreso perciò ogni valore che, nella loro storia, critica e recente, la città, il piccolo centro, od anche l'insediamento più isolato e modesto, abbiano saputo esprimere” (Di Gioia, 1975).

Inoltre viene notato che nell'accezione più diffusa il “centro” non sia riferito alla sua posizione rispetto al resto dell'insediamento e che l'aggettivo “storico” non sia quasi mai condizionato da una veneranda età dell'insediamento (Manieri, 1978).

Potrebbe essere infatti considerata un difetto la parola “centro” che allude ad una raffigurazione geometrica o geografica di una parte del territorio dove dovrebbe vivere un gruppo di individui, distinguendosi allora ad esempio dal “nucleo edilizio”. È difettosa inoltre la parola “storico”, estremamente generica se consideriamo che tutto il nostro territorio è stato «conformato da millenni dalla mano dell'uomo.

Nel 1979 Di Stefano lamenta la confusione ancora presente sia negli atti ufficiali che nei discorsi correnti, nell'uso e nel significato dei due termini, riscontrando una diffusa inversione di significato dell'uso degli stessi, e definisce il centro storico di una città come «la parte vecchia (e, a volte, moderna ma non nuova e contemporanea) la quale comprende in sé i documenti dell'evoluzione civile della comunità umana che ha creato la città stessa, così come noi la vediamo», precisando che «l'individuazione del centro storico, pertanto, deve essere basata su valutazioni di carattere storico – critico (e, in genere, di tipo qualitativo), senza alcun vincolo di date predeterminate» (Di Stefano, 1979).

Dello stesso avviso è Marelli Mariani che, partendo dal presupposto di non considerare le soluzioni di tipo legislativo, né tanto meno le inapplicabili classificazioni generiche per epoche storiche e stili, maniere e scuole, sottolinea da un lato la necessità di ricerca di una periodizzazione alternativa, e dall'altro pone anche in evidenza le difficoltà, i rischi e gli equivoci che possono essere generati da una rigida definizione.

Volendo approcciarsi ad una distinzione delle tipologie di centri storici, le ipotesi di classificazioni possibili sono chiaramente molteplici, in funzione dei numerosi parametri da poter prendere in esame, da quello geografico a quello demografico, da quello morfologico a quello storico – artistico e così via. Di Stefano tenendo conto della variabile localizzazione geografica e dell'entità dei nuclei, suddivide i centri storici in: “insiemi architettonici indipendenti”, “piccoli centri urbanizzati”, “città storiche” e “quartieri storici di grande città” (Di Stefano, 1979).

In particolare considera ad esempio come “insiemi architettonici indipendenti” i castelli o i monasteri e precisa che «possono essere inclusi tra i centri storici, sempre che essi non siano allo stato di rudere e siano ancora abitati e vitali». I “piccoli centri

urbanizzati” sono costituiti da poche migliaia di abitanti e sono per lo più rurali, marittimi e montani; vengono considerati per il loro interesse culturale, anche se con scarsa importanza dal punto di vista economico ed amministrativo. Le “città storiche” possono essere a carattere omogeneo o misto, «non sono state seriamente interessate dalla urbanizzazione e dall’esplosione demografica e non risultano molto alterate nelle loro strutture urbane». Infine i “quartieri storici delle grandi città” vengono ulteriormente suddivisi in:

- 1) quartiere storico su via d’acqua che attraversa la città, o sul mare;
- 2) quartiere storico in prossimità di un insieme monumentale o archeologico di notevole interesse posto all’interno della città;
- 3) quartiere storico in prossimità di grandi spazi verdi;
- 4) quartieri storici isolati, circondati dai quartieri moderni.

Altre classificazioni sono di carattere dimensionale o di tipo demografico – sociale come quella individuante le categorie di: centri storici a carattere direzionale inclusi in aree metropolitane, centri storici con tendenza al degrado nei quartieri per immigrati inclusi in aree metropolitane, centri storici in fase di equilibrio e di assestamento, centri storici in fase di esodo ma nei quali sussiste ancora attività edilizia e centri storici in fase di esodo e di abbandono.

Altre ancora prendono in considerazione delle categorie tipologiche, a cui far corrispondere diversi percorsi logici di progetto, come ad esempio quella di Vianello che individua: centri storici in aree collinari con edilizia seriale (contrade), centri storici in pianura con edilizia a maglie larghe allineata su strade o corsi d’acqua, centri storici in aree lagunari o litorali con tessuti a pettine paralleli alla linea di costa, centri storici anche estesi ma con andamenti planimetrici e tessuti edilizi semplici e seriali (Vianello, 1988).

Alcuni tentativi di classificazione come l’ultimo citato, sono generati dalla ricerca di un più fluido approccio progettuale verso il costruito, mentre i precedenti ed altri, vogliono essere strumentali ad una comprensione più ampia ed articolata della questione, soprattutto in considerazione del fatto che ormai già alla fine degli anni ’70 il concetto di centro storico si è ampliato: «ci si può riferire non solo alla parte antica di una città soggetta alle dinamiche dello sviluppo...ma anche ad un nucleo antico coincidente con il tessuto urbano nella sua totalità» (Carci, 1980).

In tale contesto a seguito della Convenzione Europea del Paesaggio (Firenze, 20 ottobre 2000) è stata data una definizione univoca e condivisa al termine “paesaggio”, in cui devono necessariamente essere considerati i centri storici. La Convenzione

considera il paesaggio come “*determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni*” è la “*componente essenziale del contesto di vita delle popolazioni, espressione della diversità del loro comune patrimonio culturale e naturale, nonché fondamento della loro identità*”. Il termine paesaggio definisce quindi una parte di territorio che viene riconosciuta o meglio “percepita” dalle popolazioni che abitano tale luogo. Questo riconoscersi delle popolazioni in un territorio è strettamente legato alle forme spaziali e temporali che la popolazione stessa percepisce nel luogo, permettendole di disegnare e dare forma al territorio. Questo carattere del paesaggio è legato quindi a fattori naturali e a fattori culturali/antropici, chiarendo definitivamente che il concetto di paesaggio non è definito solo dall’ambiente ma soprattutto dalle trasformazioni che le popolazioni riversano sui loro territori, per determinare un connubio che ci permette di osservare “quel paesaggio” e riconoscerlo come tale. La Convenzione si applica a tutto il territorio e “*riguarda gli spazi naturali, rurali, urbani e periurbani. Essa comprende i paesaggi terrestri, le acque interne e marine. Concerne sia i paesaggi che possono essere considerati eccezionali, che i paesaggi della vita quotidiana e i paesaggi degradati.*”. Il campo di applicazione definito dalla Convenzione è volutamente vasto in quanto ogni paesaggio costituisce un ambito delle popolazioni la cui qualità paesaggistica ha una grande influenza sulla loro vita. L’inclusione di tutto il territorio dipende dalla constatazione che ciascun spazio riesce a instaurare delle relazioni e delle interconnessioni complesse tra luoghi, come i paesaggi urbani e rurali; o ancora dipende dalle profonde modifiche che subiscono i paesaggi europei, come quelli periurbani, oppure dalla concentrazione della popolazione europea nella città, con la necessità di assicurare loro una qualità del paesaggio urbano. Per tali ragioni i centri storici, considerati come parte integrante del territorio, rientrano nel merito delle definizioni stabilite dalla Convenzione.

La Convenzione Europea opera una svolta concettuale sia sul significato sia sull’applicazione del concetto di paesaggio. L’innovazione principale è stata quella di fondare il proprio dettato normativo sull’idea che il paesaggio rappresenti un “bene”, indipendentemente dal valore concretamente attribuitogli. Rappresenta quindi una vera e propria rivoluzione concettuale con la quale viene superato l’approccio settoriale del paesaggio in funzione di una visione integrata e trasversale. Altro aspetto innovativo della convenzione è la dimensione sociale e partecipata del paesaggio, con l’introduzione del “fattore percettivo”, è solo la percezione della popolazione che può legittimare il riconoscimento del paesaggio in quanto tale introducendo così nuove

scaie di valori e valutazione. La definizione del campo di applicazione espressa dalla Convenzione può definirsi anch'essa rivoluzionaria, in quanto guarda al paesaggio come una categoria concettuale che si riferisce all'"intero territorio", il paesaggio non viene definito solo da una serie di eccellenze ma sono inclusi anche i paesaggi della vita quotidiana e i paesaggi degradati (Convenzione Europea del Paesaggio, in *Congresso dei poteri locali e regionali del Consiglio d'Europa*, Firenze, Vol. 20, 2000).

Dalle definizioni elaborate negli anni e dai tentativi di classificazione è chiaro che è necessario che si sottintenda sempre e comunque la più ampia visione possibile che comprenda in sé la concezione di centro storico contemporaneamente quale bene culturale, bene economico e bene sociale.

La concezione di centro storico quale bene culturale, asserita da Pane e Bonelli, pur sembrando apparentemente la più adeguata, rischia invece l'eccessiva teoricità nel momento in cui viene diffusamente interpretata mettendo in secondo piano le qualità economiche-sociali dei centri storici, fino a giungere a posizioni estreme quali quella di Samonà che li considera unicamente destinabili alla contemplazione per l'inadeguatezza dei tessuti e delle architetture storiche alle esigenze della vita contemporanea.

Infine vi è la nozione di centro storico come bene sociale che può anche essa portare a diversi errori operativi nel momento in cui si trascura la precedente componente culturale, come l'adattamento anche traumatico di strutture antiche a funzioni di carattere collettivo scambiando i mezzi con gli scopi e confondendo il restauro con il riuso dell'esistente, o l'applicazione acritica della predicata conservazione sociale intesa come tendenza al meccanico mantenimento degli abitanti residenti nel centro storico che, come ha osservato Campos Venuti, non fa altro che accentuare il processo di ghettizzazione spontanea.

1.3 I centri storici nella legislazione italiana

L'evoluzione del concetto di centro storico cammina di pari passo l'evoluzione dalla legislazione nazionale e regionale in materia. La prima effettiva definizione di centro storico di matrice legislativa si ebbe nel 1967, quasi trenta anni dopo le famose leggi di tutela del 1939 (La 1089/39 e la 1497/39). L'Italia, in questo senso, si mostrava particolarmente arretrata nell'affrontare la questione dei centri storici, rispetto a paesi quali la Francia, l'Olanda, la Polonia, l'ex Cecoslovacchia e la ex Jugoslavia, che già nel dopoguerra presentavano la consapevolezza di una realtà, all'interno della città, che necessita di strumenti di analisi, pianificazione ed intervento particolari in relazione alla vetustà ed al valore artistico - monumentale dell'oggetto (D'Alessio, 1983).

Al riguardo è noto che le leggi di tutela del 1939 furono emanate in un periodo in cui la cultura ignorava totalmente qualsiasi nozione di centro storico, inteso come entità unitaria, con valore indipendente dai suoi singoli monumenti.

In particolare nella legge 1/6/1939 n. 1089 mancano infatti disposizioni volte alla salvaguardia dei centri storici in quanto non se ne concepiva appunto neanche la sussistenza; nel testo legislativo ci si riferisce solo a singoli monumenti e non all'ambiente, se non in termini di cornice dell'oggetto, tanto che si arriva a teorizzare l'eliminazione di parte del cosiddetto tessuto connettivo, per ammirare al meglio e nella loro individualità, i monumenti (Aveta, 2001).

Nella legge 20/6/1939 n. 1497 si può considerare, quale più vicino riferimento alla nozione comune di centro storico quello dell'art. 1 dove si parla di «complesso di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale», tuttavia, nell'art. 9 del regolamento di attuazione della legge (approvato con r.d. 3/6/1940 n. 1357), vi sono degli elementi che potrebbero far dubitare di una effettiva concreta applicabilità della stessa ai centri storici, o comunque alla totalità di essi (D'Alessio, 1983).

Anche nella legge 17/8/1942 n. 1150 non troviamo alcun riferimento ai centri storici, certi del fatto che «l'espressione “centro storico” non può essere intesa come una trasposizione con diversa aggettivazione di “centri abitati”», cui si fa cenno nell'art. 1 della suddetta legge.

Come precedentemente accennato, un riferimento esplicito ai centri storici si trova, per la prima volta, nell'art. 17 comma 5 nella legge 6/8/1967 n. 765, detta “legge ponte” dove si afferma che «qualora l'agglomerato urbano rivesta carattere storico, artistico o di particolare pregio ambientale sono consentite esclusivamente opere di

consolidamento e restauro, senza alterazioni di volumi»¹², ma ancora non è presente una chiara definizione ed individuazione di essi, che viene invece poco dopo introdotta dalla circolare del Ministero dei LL.PP. n. 3210 del 28/10/1967 dove si descrivono tre tipologie di strutture urbane, identificabili quali centri storici:

- a) le strutture urbane in cui la maggioranza degli isolati contengono edifici costruiti in epoca anteriore al 1860, anche in assenza di monumenti o di edifici di particolare valore artistico;
- b) le strutture urbane racchiuse da antiche mura in tutto o in parte conservate, ivi comprese le eventuali propaggini esterne che rientrino nella definizione del punto a);
- c) le strutture urbane realizzate anche dopo il 1860, che nel loro complesso costituiscano documenti di un costume edilizio altamente qualificato.

È un tentativo di definizione rimasto isolato da un punto di vista legislativo e che oggi è ritenuto largamente superato (Delfino, 1976).

L'anno successivo il D.M. 1/4/1968 n. 1444, integrativo della “legge ponte”, introducendo le zone territoriali omogenee, gli standard ed i limiti di densità e altezza degli edifici, pone un'attenzione particolare ai centri storici. All'art. 2 vengono definite come zone A: «le parti del territorio interessate da agglomerati urbani che rivestono carattere storico, artistico o di particolare pregio ambientale o da porzioni di essi, comprese le aree circostanti, che possono considerarsi parte integrante, per tali caratteristiche, degli agglomerati stessi» e nell'art. 4 viene espressa una certa sensibilità nell'affrontare l'applicazione degli standard, introdotti nell'art. 3, nelle suddette zone.

In realtà in questo atto normativo si intravede una nozione ristretta di “centro storico”, considerato come zona da sottoporre a vincoli conservativi e coincidente solo con la parte più antica dell'agglomerato (Coppola, D'Angelo, & Spena, 2004).

Nello stesso anno il progetto di legge elaborato dalla Commissione Papaldo inquadra i centri storici, così come aveva fatto poco tempo prima la Commissione Franceschini, tra i beni ambientali, ed introduce all'art. 59 il concetto di “beni ambientali presunti” affermando che «i centri storici e i nuclei insediativi di carattere storico o artistico sono da considerare beni ambientali presunti...sino a quando non siano stati stabiliti i perimetri indicati nell'articolo seguente...sono sottoposti alla disciplina di questa legge nei loro limiti naturali».

Nella legge 22/10/1971 n. 865, detta “legge sulla casa”, si parla di “centri edificati”, distinti nell'art. 16 ai fini della determinazione dell'indennità di espropriazione, dalle “aree delimitate come centri storici”; l'articolo è stato poi modificato dall'art. 14 della

legge 28/1/1977 n. 10 in quanto dichiarato incostituzionale, non per ciò che concerneva i centri storici, ma per il criterio di commisurazione dell'indennizzo.

La legge 10/77, detta legge Bucalossi, è interessante maggiormente per l'8° comma dell'art. 4, che estende dai centri storici agli interi centri abitati le prescrizioni del succitato art. 17, comma 5 della “legge ponte”. Infine nella famosa legge 5/8/1978 n. 457 non si fa mai cenno né al patrimonio architettonico né ai centri storici (Di Stefano, 1979) che sembrano essere qui considerati non in quanto tali, bensì come rientranti nel più vasto ambito di aree in cui è preponderante l'esigenza di recupero

Passando ora ad analizzare alcune leggi regionali. La prima regione a fornire, ancora prima della circolare del 1967, una seppur indiretta definizione di centro storico, è stata l'Emilia Romagna, nella L.R. 7/1/1974 n. 2, contenente i “Primi provvedimenti per la tutela, la conservazione e la valorizzazione dei centri storici”. All'art. 36 vengono definite le “zone culturali ambientali” consistenti negli: «insediamenti storici uniti senza soluzioni di continuità con l'espressione urbana» che «riguardano, oltre al nucleo originario, gli organici ampliamenti ad esso storicamente connessi anche se non contigui» e negli «insediamenti storici isolati ovvero iscritti in perimetri murati o comunque definiti».

La regione che senza dubbio ha legiferato di più sul tema, è il Veneto che ha disciplinato, tra il 1980 ed il 2001, ben tre leggi. Nella L.R. 31/5/1980 n. 80 contenente “Norme per la conservazione e il ripristino dei centri storici del Veneto” all'art. 2 «si considerano centri storici gli agglomerati insediativi urbani che conservano nell'organizzazione territoriale, nell'impianto urbanistico o nelle strutture edilizie i segni di una formazione remota e di proprie originarie funzioni economiche, sociali, politiche o culturali. Costituiscono parte integrante di ciascun centro storico le aree in esso ricomprese o circostanti che, pur non avendo le caratteristiche di cui al primo comma, sono ad esse funzionalmente collegate, in quanto interessate da analoghi modi d'uso».

Nella successiva L.R. 9/8/1999 n. 37 (Norme di programmazione per l'insediamento di attività commerciali nel Veneto) all'art. 23 viene fornita un'altra caratterizzazione di centro storico, in riferimento al D.M. 2/4/1968 n. 1444, definito come «l'area definita ai sensi dell'articolo 2 del Decreto Ministeriale 2 aprile 1968, n. 1444 zona A, e cioè le parti del territorio interessate da agglomerati urbani che rivestono interesse storico, artistico e di particolare pregio ambientale o di porzioni di esso, comprese le aree circostanti che possono considerarsi parte integrante, per tali caratteristiche, degli agglomerati stessi secondo le indicazioni del piano regolatore generale, nonché gli edifici singoli aventi caratteristiche di valore ambientale -

architettonico»; ed infine segnaliamo la L.R. 1/2/2001 n. 2 (Intervento regionale a favore dei centri storici dei comuni minori), contenente una individuazione dei “comuni minori”, che sarà in seguito ripresa.

La Provincia Autonoma di Trento ha legiferato in materia dei centri storici con le leggi provinciali 6/11/1978 n. 44 e 18/8/1980 n. 26 (Norme per la tutela ed il recupero degli insediamenti storici). All’art. 2 della seconda vengono individuati genericamente quali insediamenti storici: «tutti gli immobili isolati o riuniti in complessi, dipendenti da funzioni tradizionali che possono essere tutelate e mantenute nel mondo moderno o che possono essere restituite a nuove funzioni coerenti con quelle originarie o ancora che non possono essere mantenute né sostituite, ma meritano di essere ricordate attraverso la conservazione testuale dei manufatti».

La Regione Abruzzo definisce invece i centri storici nella L.R. 12/4/1983 n. 18 contenente “Norme per la conservazione, tutela, trasformazione del territorio della Regione Abruzzo” all’art. 78 come «i nuclei antichi, gli agglomerati avente carattere storico - artistico e pregio ambientale, ricomprendendo anche aree esterne che costituiscono pertinenze funzionali quali: a) strutture urbane in cui la maggioranza degli isolati contengano edifici costruiti in epoca anteriore al 1870, anche in assenza di monumenti isolati o edifici di particolare valore artistico; b) strutture urbane racchiuse da antiche mura in tutto o in parte conservate, ivi comprese le eventuali propaggini esterne, che rientrino nella precedente lettera a); c) strutture edilizie antecedenti al 1940 che, nel loro complesso, costituiscano esempi di architettura qualificata». Infine la Regione Campania fornisce all’art. 2 (“Classificazione e censimento”) del Titolo I (“Conservazione e valorizzazione dei centri storici”) della L.R. 18/10/2002 n. 26 (Norme ed incentivi per la valorizzazione dei centri storici della Campania e per la Catalogazione dei Beni Ambientali di qualità paesistica. Modifiche alla legge regionale 19/2/1996 n. 3) le definizioni di “centri storici”, “nuclei antichi” e “quartieri urbani antichi”. Rimandando al paragrafo 2.3 per una più approfondita analisi del testo legislativo, ci limitiamo qui a fare delle osservazioni unicamente in relazione alle suddette definizioni. I centri storici sono definiti «impianti urbanistici o agglomerati insediativi urbani che sono stati centri di cultura locale o di produzione artistica e che, accanto alle testimonianze di cultura materiale, contengono opere d’arte entro il contesto storico per cui sono nate e in rapporto con il tessuto urbano, esteso al contesto paesaggistico di pertinenza, come risulta individuato nell’iconografia tradizionale, e che conservano l’aspetto o i connotati d’insieme della città storica o di una consistente parte di essa». Tale nozione, che pecca di una tortuosità non auspicabile nelle definizioni, per loro stessa natura, sembra porre in primo piano non

tanto il valore storico, urbanistico, architettonico, ambientale e corale del centro storico, quanto la riduttiva visione di esso quale contenitore di opere d'arte, lasciando a tutto il resto, e soprattutto al “contesto paesaggistico di pertinenza”, un'obsoleta funzione di cornice che tanto ci ricorda Quatremere de Quincy e la carta di Atene del 1931, ignorando dunque tutta la successiva evoluzione del dibattito, dalla Carta di Venezia del 1964 alla Carta di Washington del 1987 in cui non si parla più di centro storico, ma di salvaguardia di città storica. I nuclei antichi sono definiti «insediamenti extraurbani minori, come casali, masserie, casini di caccia, conventi, abbazie, fortificazioni, connessi allo sviluppo storico di un insediamento maggiore o di un sistema insediativo territoriale». Qui non risulta chiaro come si possa dare ad un generico termine quale “nucleo antico” l'unica localizzazione extraurbana, trascurando il fatto che tali nuclei possano essere compresi anche all'interno di una città. A tal proposito ricordiamo che gli elementi sopra elencati come “nuclei antichi” erano stati da Di Stefano (Aveta, 2001) diversamente classificati come “insiemi architettonici indipendenti” che potevano «essere inclusi tra i centri storici, sempre che essi non siano allo stato di rudere e siano ancora abitati e vitali». I quartieri urbani antichi sono definiti «frammenti o parti di insediamenti urbani sopravvissuti alla distruzione o a profonde modificazioni dei rispettivi centri abitati che, pur non possedendo autonomia funzionale, conservano valore storico-documentale e connotati artistici-ambientali d'insieme».

In questa definizione non appare chiaro cosa si intenda per mancanza di autonomia funzionale, così come non si comprende se il termine quartiere si riferisce alla suddivisione amministrativa esistente o se voglia genericamente indicare un pezzo di città.

In conclusione, concordando con Bartolomei quando scrive che «una definizione giuridica consolidata della dottrina o giurisprudenza di “centro storico” non sussiste e, modestamente, non potrebbe sussistere: sarebbe una definizione azzardata rispetto all'evoluzione e/o involuzione del dibattito subite dal vivere sociale contemporaneo», è da sottolineare non tanto la necessità di una definizione univoca e culturalmente aggiornata che abbia valenza nazionale, quanto di una, senza dubbio più importante, legge nazionale interamente dedicata ai centri storici, basata sul presupposto di attuare una loro attiva conservazione.

1.4 I centri storici “minori” tra urbanistica e architettura

Lo studio dei centri storici è un’operazione particolarmente complessa in quanto si presentano di tipologie e dimensioni differenti strettamente collegate alle vicende storiche subite, all’epoca di fondazione, alla collocazione geografica etc.

Per semplificare è importante suddividere i centri storici in tre macro categorie: grandi, medi e piccoli. L’attenzione, in questo studio, è rivolta ai centri storici definiti “minori”, ossia tutte le realtà urbanistiche storiche che presentano un numero di abitanti inferiore a 5000. Tali centri rappresentano, in Italia, un notevole patrimonio storico, culturale ed economico e la loro definizione non può essere esclusivamente demandata alle caratteristiche dimensionali ma deve riguardare soprattutto le caratteristiche fisiche, storiche e socio-economiche. Purtroppo la cultura urbanistica italiana ha tenuto e continua a tenere in scarsa considerazione queste realtà rispetto alle grandi aree urbane. Questi piccoli centri invece costituiscono una parte rilevantissima del sistema insediativo italiano poiché le loro peculiarità consistono non alcune volte di grandi episodi monumentali ma soprattutto di un tessuto urbano connettivo, costituito da edilizia corrente, vie, piazze, percorsi murati, che originano nell’insieme un unico grande “monumento urbano” (Figura 1-1). Tale fenomeno aggregativo, descritto in maniera dettagliata da Caniggia e Maffei nel volume *Lettura dell’edilizia di base* consente una lettura delle strutture edilizie in chiave storico-tipologica alle diverse scale: edifici come individuazione di tipi edilizi; aggregati come individuazione di tessuti tipici; organismo insediativo e urbano come individuazione di connessioni tipiche tra aggregati; organismo territoriale come individuazione di connessioni tipiche tra organismi vari, insediativi, produttivi ed urbani. (Caniggia & Maffei, 2008).



Figura 1-1 Centri storici italiani prima e dopo i recenti eventi sismici

La maggior parte di questi centri sono sorti nel periodo medioevale, a causa delle invasioni barbariche che distrussero tutto l'impianto territoriale di epoca romana. Le popolazioni si rifugiarono sulle alture sia per motivi difensivi che per la qualità dell'aria poiché, con la distruzione delle imponenti opere di bonifiche romane, i territori erano ritornati ad essere paludosi con il proliferare di malattie endemiche.

In questo preciso momento storico nascono nuovi centri che seguono una tipologia urbana ben definita e ripetuta sul territorio nazionale, strettamente legata alla morfologia altimetrica dell'ambito territoriale scelto e alle caratteristiche economiche del sistema sociale.

In particolare si sviluppano una serie di impianti, definiti “a fuso”, “ad avvolgente”, “entro i margini”, “a ventaglio”, “radiale” etc. (Figura 1-2) che dipendono dalla conformazione orografica e che generano architetture complesse nella maggior parte dei casi sotto forma di aggregati strutturali (Pelliccio et al., 2017).

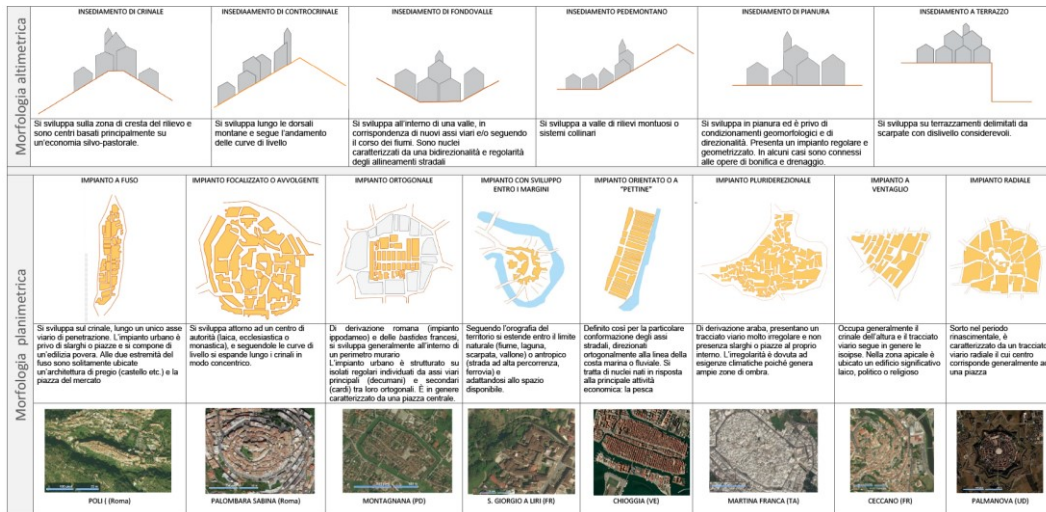


Figura 1-2 Schematizzazione delle morfologie altimetriche e planimetriche più comuni dei centri storici minori.

Le architetture di questi centri sono realizzate in muratura portante, con materiali poveri, spesso ottenuto dal riuso delle macerie degli edifici preesistenti, con coperture a tetto o a terrazzo in funzione delle regioni geografiche, e orizzontamenti vari come solai in legno, voltati, misti, etc., esiti delle conoscenze delle maestranze locali (Bradaschia, 1996).

Le unità abitative sono solitamente collegate le une alle altre, perché economicamente più vantaggioso, in modo da definire degli “aggregati strutturali”; spesso si trovano in pendii e soggetti a massivi interventi di rifacimento e trasformazione avvenuti nel corso dei secoli per rispondere alle nuove esigenze abitative. Questo ultimo processo ha generato architetture estremamente eterogenee che con significative vulnerabilità dal punto di vista strutturale (Figura 1-3).

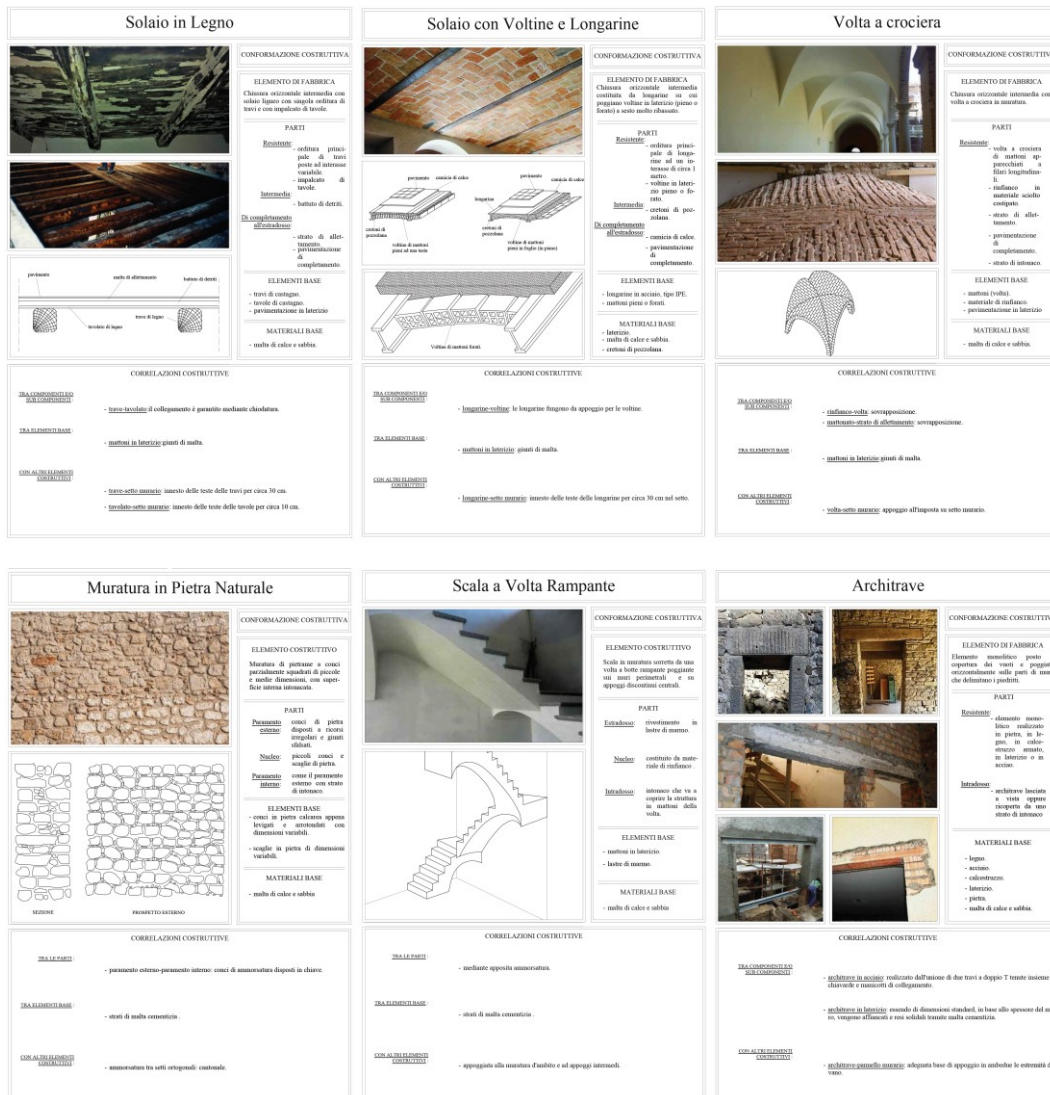


Figura 1-3 Elementi tipici che costituiscono l'architettura e la struttura dei centri storici.

1.5 Un GIS per la mappatura dei centri storici minori nel territorio nazionale

Come precedentemente detto, i centri storici presentano significative vulnerabilità strutturali dovute sia al sistema tecnologico utilizzato per la costruzione che alle trasformazioni subite nel corso dei secoli. A questo si aggiungono le caratteristiche geologiche del territorio nazionale fortemente sismico che incrementano il rischio a cui sono soggetti (Bellicini, 2012).

Per avere una visione d'insieme del fenomeno è stata necessaria una mappatura dei centri storici realizzata in ambiente GIS, focalizzando l'attenzione su quelli che abbiamo definito come “minori” (§2.4).

Da un punto di vista statistico i centri storici minori, come precedentemente asserito non per la qualità architettonica e urbanistica ma soltanto per le peculiarità dimensionali, costituiscono l’ossatura dei comuni in Italia: dei 7914 comuni italiani (dato ISTAT aggiornato al 6/10/2019), 5.836 hanno una popolazione inferiore ai 5.000 abitanti di cui 3.651 inferiore ai 2.000, di cui 1.971 inferiore ai 1.000 e di cui infine 845 inferiore ai 500. Dai dati si evince come la maggior parte dei comuni italiani siano dei piccoli centri, anche se ospitano poco meno del 20% della popolazione complessiva, su di un territorio corrispondente a circa il 54% del territorio nazionale.

Tabella 1-1 Fasce demografiche di interesse per i comuni italiani

Fascia demografica	Comuni		Popolazione	
	numero	%	residenti	%
da 500.000 ab. e oltre	6	0.08%	7.336.149	12.13%
da 250.000 a 499.999 ab.	6	0.08%	1.923.795	3.18%
da 100.000 a 249.999 ab.	33	0.42%	4.913.191	8.12%
da 60.000 a 99.999 ab.	60	0.76%	4.614.583	7.63%
da 20.000 a 59.999 ab.	419	5.29%	13.709.350	22.67%
da 10.000 a 19.999 ab.	708	8.95%	9.747.333	16.12%
da 5.000 a 9.999 ab.	1.186	14.98%	8.369.615	13.84%
da 3.000 a 4.999 ab.	1.098	13.87%	4.278.496	7.07%
da 2.000 a 2.999 ab.	947	11.96%	2.326.553	3.85%
da 1.000 a 1.999 ab.	1.520	19.20%	2.211.834	3.66%
da 500 a 999 ab.	1.095	13.83%	807.426	1.33%
meno di 500 ab.	836	10.57%	245.648	0.41%
totale	7.914	100.00%	60.483.973	100.00%

Tabella 1-2 Fasce demografiche di interesse per i comuni italiani

Fascia demografica	Comuni		Popolazione	
	numero	%	residenti	%
meno di 5000 ab.	5.497	69.45%	9.869.957	16.32%
meno di 4000 ab.	5.031	63.56%	7.780.265	12.86%
meno di 3000 ab.	4.399	55.58%	5.591.461	9.24%
meno di 2000 ab.	3.452	43.61%	3.264.908	5.40%
meno di 1000 ab.	1.932	24.41%	1.053.074	1.74%

È stato poi progettato un database contenente informazioni dei codici di regione, provincia e comune; del toponimo; del perimetro dell’area comunale; della superficie in kmq del comune; del numero di abitanti; della densità abitativa intesa come rapporto tra il numero di abitanti e la superficie (Figura 1-6).

COD_REG	COD_PROV	PRO_COM	PRO_COM_T	COD_ARE	Shape_Area	db_2019_Re	db_2019_Ti	db_2019_Pr	db_2019_Co	db_2019_Su	db_2019_Po	db_2019_De	orig_qcc_id
18	78	78146	078146	Terranova de Sibari	43456082.97689	Calabria	Provincia	Cosenza	Terranova de Sibari	43.46000000000000	4990	114.82999999999999	6659
12	58	58098	058098	San'Angelo Romano	21356635.37460	Lazio	Citt? Metropolitana	Roma Capitale	San'Angelo Romano	21.359999999999999	4987	233.50999999999999	2923
4	22	22079	022079	Dro	27953422.49900	Trentino-Alto Adige	Provincia	Trento	Dro	27.949999999999999	4986	178.36000000000000	5377
3	13	13007	013007	Alzate Brianza	7984700.514589	Lombardia	Provincia	Como	Alzate Brianza	7.9900000000000000	4985	657.22000000000000	2645
10	55	55029	055029	San Gemini	27895615.67630	Umbria	Provincia	Terni	San Gemini	27.899999999999999	4985	178.69999999999999	5234
3	12	12078	012078	Gorla Maggiore	5158020.070419	Lombardia	Provincia	Varese	Gorla Maggiore	5.1600000000000000	4984	966.26999999999999	1042
3	16	16172	016172	Pontrale Nuovo	11097632.78199	Lombardia	Provincia	Bergamo	Pontrale Nuovo	11.1000000000000000	4983	449.00000000000000	4544
19	83	83096	083096	Spadafora	10524618.83550	Sicilia	Citt? Metropolitana	Messina	Spadafora	10.5200000000000000	4983	473.43999999999999	7420
3	15	15200	015200	Santo Stefano Ticino	4966239.330459	Lombardia	Citt? Metropolitana	Milano	Santo Stefano Ticino	4.9700000000000000	4982	1003.22000000000000	4636
17	77	77029	077029	Tursi	159929982.32119	Basilicata	Provincia	Matera	Tursi	159.9300000000000000	4981	31.1400000000000000	4639
18	80	80097	080097	San Ferdinando	14197988.19420	Calabria	Citt? Metropolitana	Reggio Calabria	San Ferdinando	14.199999999999999	4977	350.54000000000000	6853
3	12	12106	012106	Mornago	12235619.21120	Lombardia	Provincia	Varese	Mornago	12.2400000000000000	4976	406.67000000000000	1540
3	13	13189	013189	Porlezza	18639926.02430	Lombardia	Provincia	Como	Porlezza	18.6400000000000000	4972	266.74000000000000	1960
6	30	30062	030062	Montegiano	30052818.53000	Friuli-Venezia Giulia	Provincia	Udine	Montegiano	30.0500000000000000	4969	165.34000000000000	1629
5	24	24073	024073	Novè	8151144.894319	Veneto	Provincia	Vicenza	Novè	8.1500000000000000	4966	609.25000000000000	2105
20	111	111030	111030	Gonnesa	48055428.20220	Sardegna	Provincia	Sud Sardegna	Gonnesa	48.0600000000000000	4965	103.51999999999999	7539
11	44	44054	044054	Offida	49602492.23569	Marche	Provincia	Ascoli Piceno	Offida	49.6000000000000000	4962	100.03000000000000	1096
18	78	78132	078132	Santa Maria del Cedro	18402396.49199	Calabria	Citt? Metropolitana	Cosenza	Santa Maria del Cedro	18.4000000000000000	4961	269.31000000000000	6350
1	1	1228	001228	Rosta	9065004.760469	Piemonte	Citt? Metropolitana	Torino	Rosta	9.0600000000000000	4960	547.15999999999999	365
19	81	81019	081019	Santa Ninfa	60940630.61599	Sicilia	Provincia	Trapani	Santa Ninfa	60.939999999999999	4953	81.269999999999999	7271
5	28	28071	028071	Rovolon	27866229.60979	Veneto	Provincia	Padova	Rovolon	27.8600000000000000	4950	178.78000000000000	3572
11	42	42015	042015	Cornaldò	490278916.96769	Marche	Provincia	Ancona	Cornaldò	49.0200000000000000	4949	100.43000000000000	2070
1	2	2137	002137	Serravalle Sesia	20905115.78090	Piemonte	Provincia	Vercelli	Serravalle Sesia	20.9100000000000000	4948	236.68000000000000	179
3	13	13228	013228	Uggiate-Trevano	5784426.508419	Lombardia	Provincia	Como	Uggiate-Trevano	5.7800000000000000	4946	854.97000000000000	3428
5	28	28073	028073	Saccolongo	13799221.04700	Veneto	Provincia	Padova	Saccolongo	13.8000000000000000	4945	358.36000000000000	1114

Figura 1-6 HT_GIS: database

Per associare il database ai singoli comuni sono stati creati i centroidi di tutti i comuni italiani e attraverso una query sono stati evidenziati soltanto quelli con una popolazione inferiore ai 5000 abitanti (Figura 1-7). Ai centroidi è stato fornito un identificativo corrispondente a quello attribuito dall’Istat ai vari comuni.

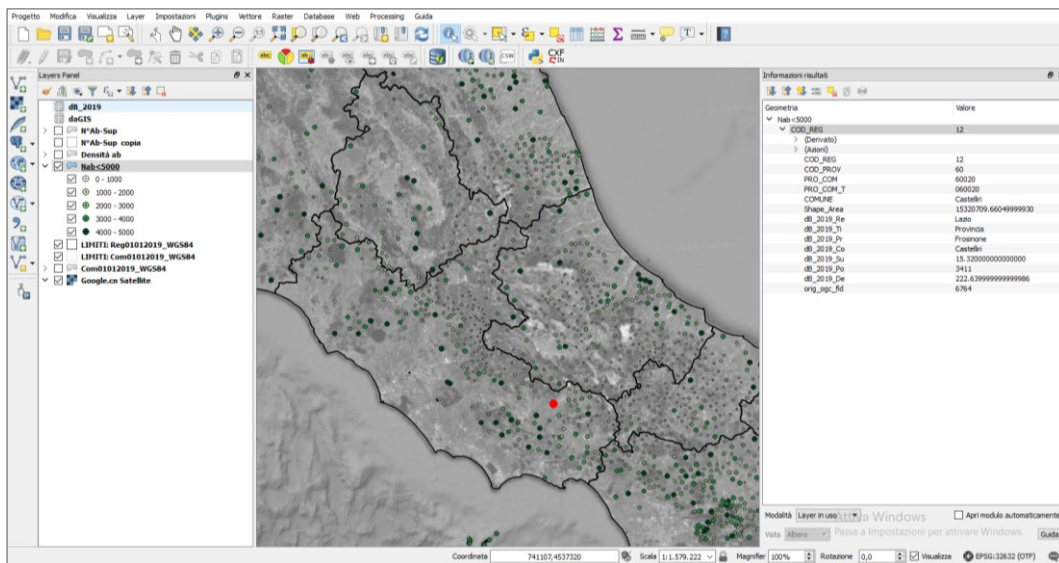


Figura 1-7 HT_GIS: centroidi per i centri storici con $n_{ab} < 5000$

Il sistema progettato è quindi in grado di visualizzare in overlay le informazioni del database associato e restituire in forma grafica la localizzazione e la dimensione per abitanti dei centri storici minori italiani (Figura 1-8).

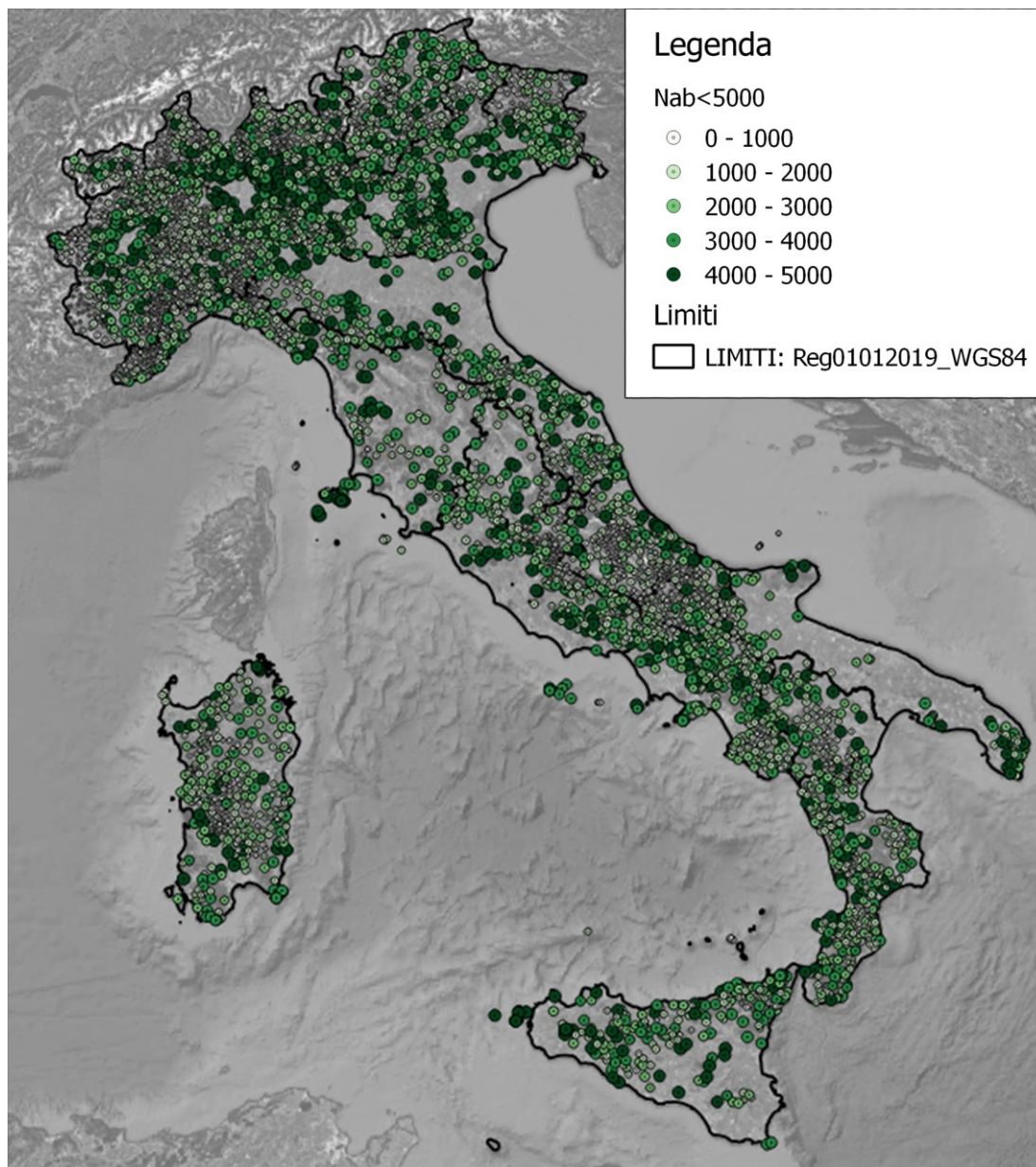


Figura 1-8 HT_GIS: geolocalizzazione dei centri storici minori con $n_{ab} < 5000$

1.6 Bibliografia

- “Convenzione Europea del Paesaggio” (2000). In Congresso dei poteri locali e regionali del Consiglio d’Europa, Firenze, Vol. 20.
- Aveta, A. (2001). *Tutela, restauro, gestione dei beni architettonici e ambientali*. CUEN.
- Bartolomucci, C., & Donatelli, A. (2012). La conservazione nei centri storici minori abruzzesi colpiti dal sisma del 2009: esigenze di riuso e questioni di conservazione. In *Scienza e beni culturali XXVIII* (Vol. 28, pp. 101-111). Edizioni Arcadia Ricerche.
- Bellicini, L. (2012). I Rapporto ANCE/CRESME. Lo stato del territorio italiano 2012. Inseidamento e rischio sismico e idrogeologico.
- Bradaschia, M. (1996). *Memoria piano progetto: architettura e tecniche per i centri storici: proposte e soluzioni a Trieste*. Laterza.
- Caniggia, G., & Maffei, G. L. (2008). *Letture dell’edilizia di base* (Vol. 215). Alinea Editrice.
- Carci, P. (1980). *I centri storici minori*. DiPiTer-Università della Calabria.
- Cervellati, P. L., & Scannavini, R. (1973). *Bologna: politica e metodologia del restauro nei centri storici*.
- Ciardini, F., & Falini, P. (1978). *Politica urbanistica e programmi di intervento pubblico: Bergamo, Bologna, Brescia, Como, Gubbio, Pesaro, Vicenza. I centri storici*.
- Coppola, A., D’Angelo, G., & Spena, M. (2004). *La legislazione dei beni culturali e del paesaggio*. Edizioni giuridiche Simone.
- D’Alessio, A. (2007). L’avancorpo dell’acropoli di Ferentino. Vecchi e nuovi dati per la lettura storica del monumento. In *Archeologia classica* (p. 397-433).
- D’Alessio, G. (1983). *I centri storici: aspetti giuridici*. Giuffrè.
- Delfino, F. (1976). Osservazioni sul problema dei centri storici. *Riv. giur. edilizia*.
- Di Gioia, V. (1975). Criteri di definizione dei centri storici. *Civiltà delle Macchine*.
- Di Stefano, R. (1979). *Il recupero dei valori: centri storici e monumenti: limiti della conservazione e del restauro*. Ed. Scientifiche Italiane.
- Franceschini, F. (1967). *Per la salvezza dei beni culturali in Italia: atti e documenti della Commissione d’indagine per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico, archeologico, artistico e del paesaggio*. Casa ed. Colombo.

- Francini, M., Colucci, M., Palermo, A., & Viapiana, M. F. (2012). I centri storici minori. Strategie di rigenerazione funzionale: Strategie di rigenerazione funzionale. FrancoAngeli.
- Maietti, F. (2008). Centri Storici Minori-Progetti di recupero e restauro del tessuto urbano fra identità culturale e salvaguardia. Maggioli Editore.
- Manieri, E. (1978). Il problema dei centri storici minori del Mezzogiorno “interno. *I centri storici, Milano, G. Mazzotta, 73-78.*
- Pane, R. (1965). Centro storico e centro antico. *Napoli Nobilissima IV.*
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017). *HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers* (Vol. 10). Aquila: DISEGNARECON.
- Portoghesi, P. (1968). Dizionario enciclopedico di architettura e urbanistica. Ist. editoriale romano.
- Rolli, G. L. (2008). Salvare i centri storici minori. Proposte per un atlante urbanistico dei centri d'Abruzzo (Vol. 3). Alinea Editrice.
- Vianello, D. (1988). Metodologia di analisi e progetto per i centri storici minori.

CAPITOLO 2.

IL RISCHIO SISMICO IN ITALIA

2.1 Il rischio sismico

Nel capitolo precedente abbiamo affrontato l'analisi dei centri storici e l'importanza che tali realtà hanno nell'identità culturale del nostro paese. Sono state per contro evidenziate anche le principali criticità che rendono particolarmente vulnerabili questi centri come ad esempio le caratteristiche geologiche del nostro territorio.

Il rischio naturale, ovvero "l'entità del danno atteso in una data area e in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso" (Pelloloni, 2014), interessa tutto il territorio nazionale e ha dimensioni rilevanti. Una parte consistente del problema è da attribuire all'elevata esposizione al rischio idrogeologico e una parte al rischio sismico. Si consideri che le aree ad elevata criticità idrogeologica rappresentano il 10% della superficie italiana (29,5 mila kmq) e riguardano l'89% dei comuni (pari a 6.631); le aree ad elevato rischio sismico sono circa il 44% del territorio nazionale (131 mila kmq) e il 36% dei comuni (pari a 2.893). La popolazione residente in queste aree è esposta ad un rischio naturale potenzialmente molto elevato. La tutela della popolazione, il risanamento idrogeologico del territorio e la messa in sicurezza del patrimonio dagli eventi disastrosi sono dunque questioni prioritarie per il Paese.

Sulla base della superficie territoriale esposta ad elevato rischio naturale, si stima che la popolazione potenzialmente esposta ad un elevato rischio idrogeologico sia pari a 5,8 milioni di persone e ad elevato rischio sismico sia pari a 21,8 milioni di persone (Gisotti & Benedini, 2000). Nelle aree ad elevata criticità idrogeologica si trovano circa 1,2 milioni di edifici e in quelle ad elevato rischio sismico 5,5 milioni (Lucatoni, 2001). La stima della popolazione e degli edifici esposti a rischio potenzialmente elevato individua un valore massimo poiché, com'è noto, in queste aree esistono già forme di tutela rispetto agli usi antropici.

2.2 Cenni di sismicità in Italia

L'Italia, se paragonata al resto del mondo, non è tra i siti dove si concentrano né i terremoti più forti né quelli più distruttivi. La pericolosità sismica del territorio italiano può considerarsi medio-alta nel contesto mediterraneo e addirittura modesta rispetto ad altre zone del pianeta. Infatti, ogni anno nel mondo accadono diversi milioni di terremoti, stando a quanto stima uno dei principali centri sismologici internazionali ovvero il National Earthquake Information Center (NEIC) del servizio geologico degli Stati Uniti. Il NEIC ne localizza ogni anno tra 12.000 e 14.000, di cui 60 sono classificati come significativi ossia in grado di produrre danni considerevoli o morti e circa 20 quelli di forte intensità, con magnitudo superiore a 7,0. Se per esempio, si consulta la mappa degli eventi avvenuti negli ultimi 30 giorni di magnitudo messa a disposizione dall'istituto U.S. Geological Survey (USGS), emerge che i Paesi maggiormente colpiti da eventi disastrosi sono Sud America, Asia e Indonesia. Questo dato è confermato anche dalla semplice consultazione dei numerosi archivi storici esistenti relativi ai principali eventi (Figura 2-1) (Rizzolati, 2016).

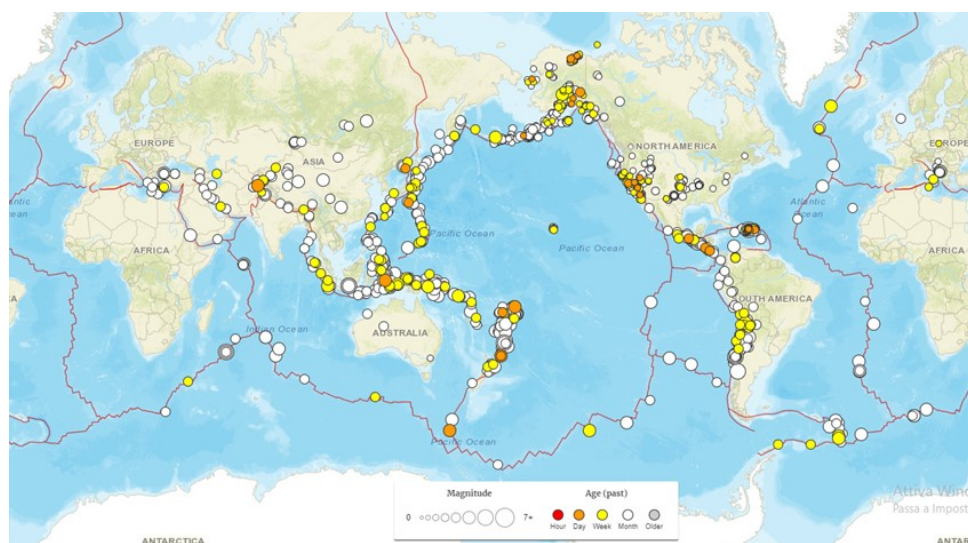


Figura 2-1 Terremoti avvenuti negli ultimi 30 giorni rilevati dalla rete USGS (fonte <https://earthquake.usgs.gov> – ottobre 2019)

La sismicità di un territorio è direttamente proporzionale alla frequenza con cui si manifestano terremoti. La sismicità Italiana dipende essenzialmente dal fatto che l'Italia è situata al margine di convergenza tra due grandi placche, quella africana e quella euroasiatica. Il movimento relativo tra queste due placche causa l'accumulo di energia e deformazione che occasionalmente vengono rilasciati sotto forma di terremoti di varia entità.

Nel 2008 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha pubblicato la carta della sismicità italiana che mostra dettagliatamente gli oltre 20.000 epicentri dei terremoti avvenuti in Italia tra il 2000 e il 2007. «La maggior parte dei terremoti - spiegano all'INGV - ha una magnitudo Richter inferiore a 4.0 ed è localizzata nella crosta terrestre al di sopra dei 35 km. Solo 11 terremoti hanno una magnitudo Richter superiore a 5.0 e il più forte terremoto si è verificato il 26 ottobre 2006 al largo della costa calabra occidentale (M=5.7) ad una profondità di 200 km» (Mele et al., 2010)

La sismicità si concentra soprattutto lungo la catena degli Appennini e nella fascia vulcanica tirrenica. Un altro punto di importante sismicità è il promontorio del Gargano, sede di notevole attività sismica. Nell'Appennino settentrionale è presente un'attività sismica a profondità intermedia. Per l'INGV «È evidente una elevata sismicità crostale al largo delle coste settentrionali della Sicilia mentre la zona del Tirreno meridionale è caratterizzata anche da sismicità profonda (fino a 600 km), dovuta al processo di subduzione della litosfera ionica al di sotto della Calabria. Sul Monte Etna è stata registrata una notevole attività sismica con frequenti terremoti di magnitudo superiore a 4.0. In Italia settentrionale la sismicità si concentra principalmente lungo la fascia prealpina orientale» (Figura 2-2).



Figura 2-2 Mappa della sismicità in Italia 2000-2012

Sulla base della mappa della sismicità storica è facile notare che i terremoti spesso avvengono in zone già colpite in passato. Gli eventi storici più forti si sono verificati in Sicilia, nelle Alpi orientali e lungo gli Appennini centro-meridionali, dall'Abruzzo alla Calabria ma si sono avuti terremoti importanti anche nell'Appennino centro-settentrionale e nel Gargano.

Nella carta sono riportati due riquadri nei quali sono rappresentati i più forti terremoti avvenuti in Italia dal 217 a.C. «L'osservazione immediata è che la sismicità recente e quella storica sono concentrate principalmente nelle stesse zone anche se il contenuto informativo della sismicità degli ultimi anni fa vedere che esistono aree sismiche che nel passato non hanno generato grandi terremoti come ad esempio al largo delle coste settentrionali della Sicilia» (Figura 2-3) (Stucchi et al., 2007).

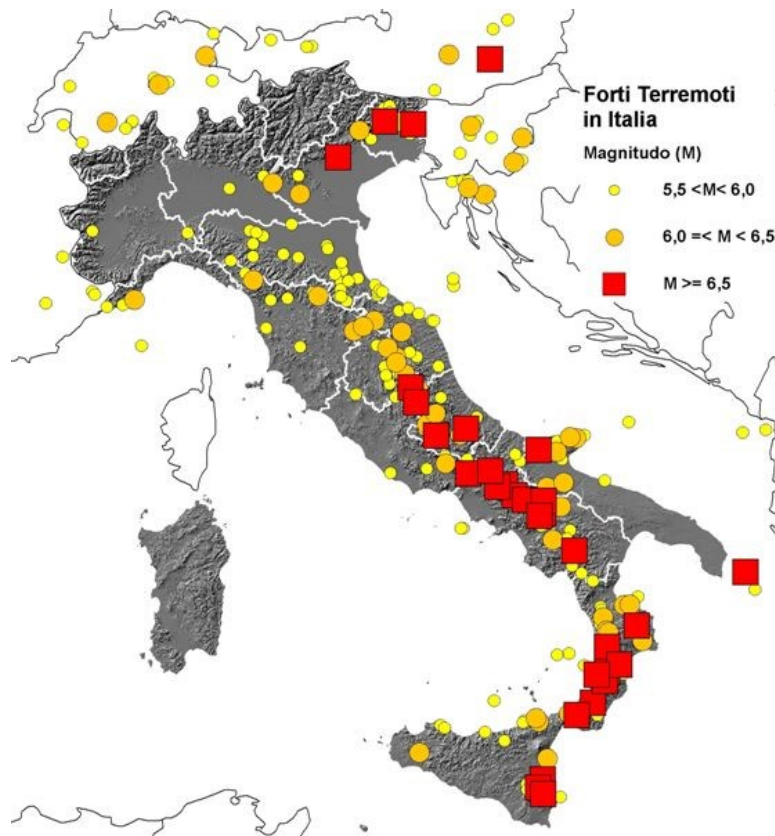


Figura 2-3 Mappa della sismicità storica in Italia tra 800 e 2004 (fonte: INGV)

Tra i terremoti italiani più forti di questo secolo si ricordano 1905 Calabria (M=7,1 - I=X/XI), 1908 Messina (M=7,2 - I=XI), 1915 Avezzano (M=7,0 - I=XI), 1930 Irpinia (M=6,7 - I=X), 1968 Belice (M=6,4 - I=X), 1976 Friuli (M=6,4 - I=IX/X), 1980 Irpinia-Basilicata (M=6,9 - I=X), 2009 L'Aquila (M=6,3 - I=IX/X), 2012 Emilia Romagna (M=6,1), 2016 Centro Italia (M=6,0 - I=X).

Rispetto agli altri Paesi il rapporto tra danni ed energia rilasciata nel corso degli eventi è elevato. Ad esempio, il terremoto del 1997 in Umbria e nelle Marche ha prodotto un quadro di danneggiamento (senza tetto: 32.000; danno economico: circa 10 miliardi di Euro) confrontabile con quello della California del 1989 (14.5 miliardi di \$ USA), malgrado fosse caratterizzato da un'energia circa 30 volte inferiore. Ciò è dovuto principalmente all'elevata densità abitativa e alla notevole fragilità del nostro patrimonio edilizio.

La rilevazione strumentale portata avanti da anni dall'INGV rivela che gli eventi sismici nel territorio italiano sono molto frequenti. Gli eventi percepiti dalla popolazione, con magnitudo superiore o uguale a 4,0, dal 1985 a oggi sono stati circa 500, di cui 44 hanno avuto una magnitudo superiore a 5,0 e spesso hanno fatto registrare vittime tra la popolazione.

In alcuni anni si è registrata la concentrazione dei fenomeni sismici più intensi. L'anno peggiore è stato il 1997 quando nel territorio nazionale sono stati registrati ben 37 eventi con magnitudo superiore o uguale a 4,0. Di questi ben 6 gli eventi più gravi, con magnitudo superiore a 5,0 tra i quali il sisma umbro-marchigiano che ha provocato 11 morti e 115 feriti. Nel 2002 gli eventi sismici con magnitudo superiore a 4,0 sono stati 35, di cui 3 oltre 5,0. Tra questi il sisma che ha coinvolto l'area pugliese-molisana e che ha provocato 30 morti nella scuola di San Giuliano. Nel 2006 sono stati registrati 35 eventi, di cui 4 oltre 5,0 gradi. Nel 2009 gli eventi sismici con magnitudo superiore a 4,0 sono stati 32, di cui 3 più gravi. Tra questi l'evento distruttivo che ha coinvolto l'Abruzzo in aprile che ha provocato 308 morti e circa 1.500 feriti. Il 2012 presenta un'eccezionale ondata di eventi rilevati, ben 50 in otto mesi di cui 8 con magnitudo superiore a 5,0. Tra questi i gravi terremoti che hanno coinvolto il territorio emiliano-romagnolo (Corradi & Gritti, 2018).

L'INGV sulla base delle rilevazioni dirette fatte attraverso la Rete Sismica Nazionale ha ricostruito la mappa della sismicità recente (ultimi 31 anni). Da questa emerge che nel periodo sono avvenuti oltre 150.000 eventi, dei quali più di 50 hanno avuto una magnitudo Richter superiore a 5,0. I più forti terremoti di questo periodo sono avvenuti in Abruzzo il 6 aprile 2009, $M_w = 6.3$, in Emilia Romagna il 20 maggio 2012, $M_w = 5.9$ e nel Centro Italia il 24 agosto 2016, $M_w = 6.0$ (Figura 2-4) (Marchetti et al., 2018).

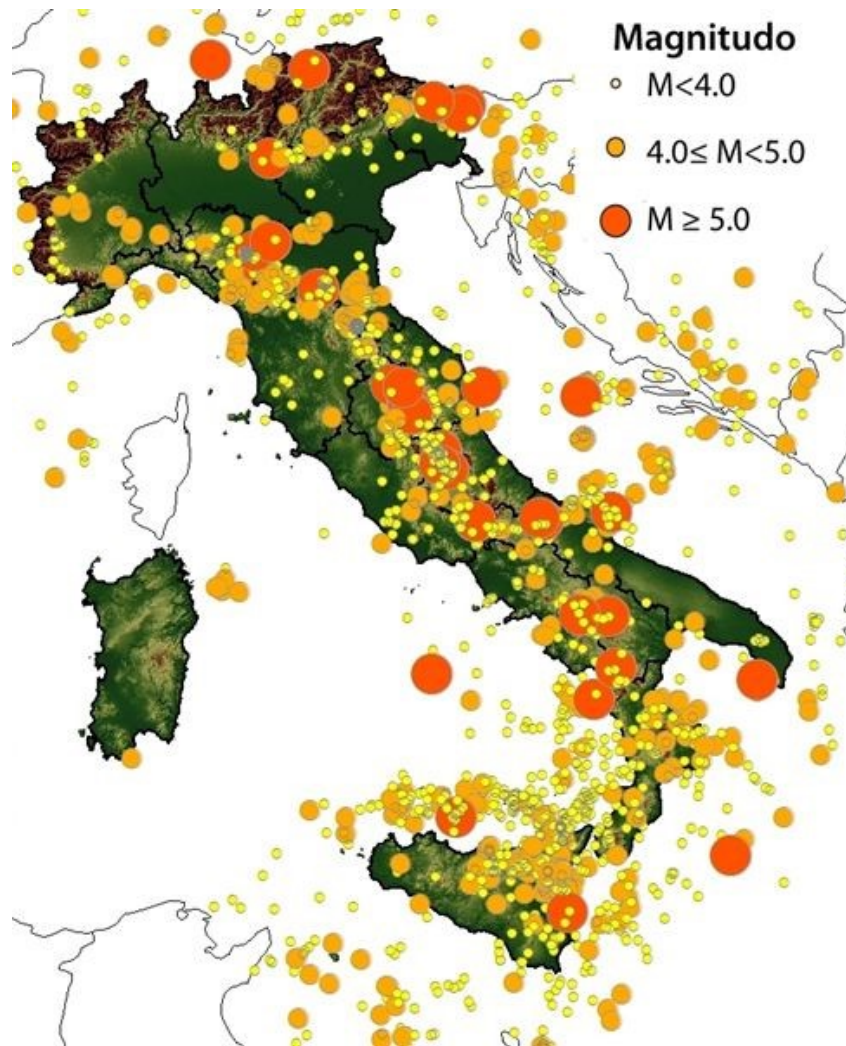


Figura 2-4 Mappa della sismicità recente in Italia tra 1981 e 2011 (fonte: INGV)

Soltanto il 25% dei terremoti si presenta in forma singola ovvero isolato dal punto di vista geografico. La maggior parte dei terremoti si manifesta in forma di cluster sismici ovvero eventi di diversa intensità localizzati a poca distanza. Tra questi rientra l'evento dell'Aquila del 2009 e quello dell'Emilia Romagna del 2012.

In particolare in Emilia Romagna, a più due mesi dall'inizio dell'attività sismica in Pianura Padana Emiliana, sono stati registrati oltre 2.300 eventi. Di questi, circa 2.000 sono avvenuti nel primo mese, con 7 eventi con magnitudo al di sopra o uguale a 5.0 e 27 con magnitudo compresa tra 4.0 e 5.0. Nel secondo mese gli eventi sono stati quasi 300 con magnitudo decisamente basse; infatti solo 5 terremoti hanno avuto magnitudo maggiore di 3.0 e il più forte ha avuto magnitudo (MI) 3.2.

Al fine di attenuare gli effetti dei futuri terremoti e sulla base della sismicità del territorio, considerando la frequenza e l'energia con cui gli eventi si sono verificati,

L'INGV ha definito la mappa della pericolosità sismica del territorio italiano. Questa mappa si basa sull'analisi dei terremoti del passato, sulle informazioni geologiche disponibili e sulle conoscenze che si hanno sul modo in cui si propagano le onde (e quindi l'energia) dall'ipocentro all'area in esame. Confrontando tutte queste informazioni è possibile ottenere i valori di scuotimento del terreno in un dato luogo a causa di un probabile terremoto, vicino o lontano che sia; tali valori sono espressi in termini di accelerazione massima orizzontale del suolo rispetto a g (l'accelerazione di gravità). La stima della pericolosità sismica fornisce l'accelerazione massima attesa su suolo rigido con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Questa mappa, in continuo aggiornamento, mostra la pericolosità delle varie zone dal minimo (colore grigio) al massimo (colore viola). Essa ha validità limitata nel tempo (10% di probabilità di superamento in 50 anni) e costituisce il riferimento per la classificazione sismica dei comuni (Figura 2-5).

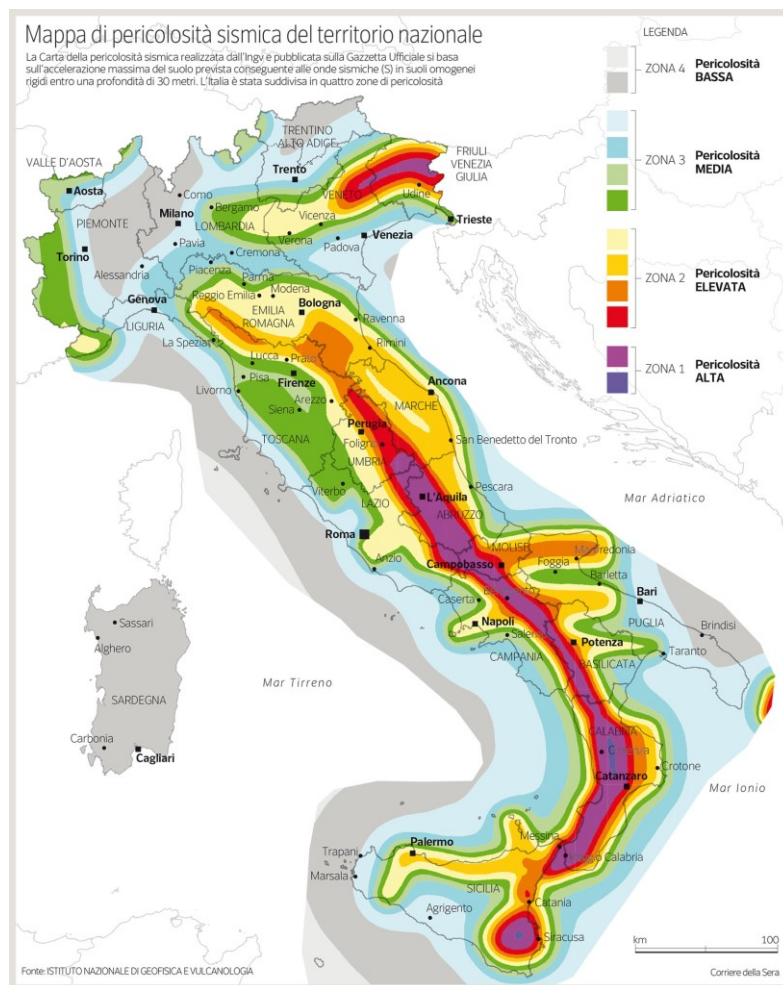


Figura 2-5 Mappa di pericolosità sismica in Italia (fonte: INGV)

Un territorio avrà una pericolosità sismica tanto più elevata quanto più probabile sarà, a parità di intervallo di tempo considerato, il verificarsi di un terremoto di una certa magnitudo. Dalla carta emerge come in Italia esistano aree particolarmente “pericolose” dal punto di vista sismico, come la Calabria, l’Abruzzo, la Sicilia Meridionale e parte del Friuli-Venezia Giulia.

La mappa di pericolosità è uno strumento fondamentale per la realizzazione di misure di prevenzione che consentano di ridurre gli effetti dei terremoti, come per esempio la costruzione di edifici resistenti alle vibrazioni dei terremoti più forti che ci si può aspettare in una determinata zona. Sulla base della mappa di pericolosità sismica, infatti, la legge italiana ha classificato il territorio nazionale in 4 zone: dalla zona 1, dove potrebbero verificarsi terremoti molto forti, alla zona 4, a bassa pericolosità ma comunque a rischio per la presenza di edifici vulnerabili.

2.3 Il rischio

Come già detto l’Italia è uno dei Paesi a maggior rischio sismico del Mediterraneo, per la sua particolare posizione geografica, nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella euroasiatica. La sismicità più elevata si concentra nella parte centro-meridionale della Penisola, lungo la dorsale appenninica (Val di Magra, Mugello, Val Tiberina, Val Nerina, Aquilano, Fucino, Valle del Liri, Beneventano, Irpinia), in Calabria e Sicilia e in alcune aree settentrionali, come il Friuli, parte del Veneto e della Liguria occidentale. Solo la Sardegna non risente particolarmente di eventi sismici.

Il rischio sismico, determinato dalla combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell’esposizione, è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti).

L’Italia ha una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza e intensità dei fenomeni), una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi) e un’esposizione altissima (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico nel mondo). L’Italia è dunque ad elevato rischio sismico, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto.

2.3.1 La pericolosità sismica

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Se si conoscono la frequenza e l’energia associate

ai terremoti che caratterizzano un territorio, e attribuiamo un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definire la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato (Sabetta & Paciello, 1995).

In Italia abbiamo numerosi studi e documenti sulla sismicità della Penisola, che costituiscono un patrimonio storico unico al mondo. Le prime considerazioni, spesso fantasiose, sull'origine dei terremoti e sulle caratteristiche sismiche del territorio italiano si rintracciano già nelle opere degli studiosi a partire al XV secolo. Ma è solo nel XIX secolo, con lo sviluppo delle scienze sismologiche, che iniziano ad essere pubblicate ricerche sulle cause e sulla distribuzione geografica dei terremoti. La diffusione degli strumenti sismici dalla fine del XIX secolo e delle reti di monitoraggio nel XX secolo daranno impulso definitivo agli studi per la caratterizzazione sismica del territorio (Delladio, 2011).

Gli studi di pericolosità sismica sono stati impiegati, soprattutto negli ultimi anni, nelle analisi territoriali e regionali finalizzate a zonazioni (pericolosità di base per la classificazione sismica) o microzonazioni (pericolosità sismica locale). In quest'ultimo caso, valutare la pericolosità significa individuare le aree a scala comunale che, in occasione di una scossa sismica, possono essere soggette a fenomeni di amplificazione e fornire indicazioni utili per la pianificazione urbanistica.

Gli studi di pericolosità possono essere utilizzati anche nelle analisi di sito, per localizzare opere critiche dal punto di vista della sicurezza, del rischio o dell'importanza strategica (centrali elettriche, installazioni militari, ospedali). Valutare la pericolosità sismica significa, in questo caso, stabilire la probabilità di occorrenza di un terremoto di magnitudo superiore al valore di soglia stabilito dagli organi politici/decisionali, portando all'eventuale scelta di aree diverse.

L'approccio alla valutazione della pericolosità può essere di tipo deterministico oppure probabilistico. Il metodo deterministico si basa sullo studio dei danni osservati in occasione di eventi sismici che storicamente hanno interessato un sito, ricostruendo degli scenari di danno per stabilire la frequenza con cui si sono ripetute nel tempo scosse di uguale intensità. Tuttavia, poiché questo approccio richiede la disponibilità di informazioni complete sulla sismicità locale e sui risentimenti, nelle analisi viene generalmente preferito un approccio di tipo probabilistico. Attraverso questo approccio, la pericolosità è espressa come la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche. Il metodo probabilistico più utilizzato è quello di Cornell che prevede vengano individuate nel territorio delle zone

responsabili degli eventi sismici (zone sismo genetiche), sia quantificato il loro grado di attività sismica e si calcolino gli effetti provocati da tali zone sul territorio in relazione alla distanza dall'epicentro (Albarello et al., 2007).

2.3.2 La vulnerabilità sismica

Le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze. Una delle cause principali di morte durante un terremoto è il crollo degli edifici. Per ridurre la perdita di vite umane, è necessario rendere sicure le strutture edilizie. Oggi, le norme per le costruzioni in zone sismiche prevedono che gli edifici non si danneggino per terremoti di bassa intensità, non abbiano danni strutturali per terremoti di media intensità e non crollino in occasione di terremoti forti, pur potendo subire gravi danni. Un edificio può riportare danni strutturali agli elementi portanti (pilasti, travi) e/o danni non strutturali agli elementi che non ne determinano l'instabilità (camini, cornicioni, tramezzi). Il tipo di danno dipende da: struttura dell'edificio, età, materiali, luogo di realizzazione, vicinanza con altre costruzioni e elementi non strutturali nonché dalla durata e dall'intensità del terremoto. Quando si verifica un terremoto, il terreno si muove orizzontalmente e/o verticalmente, sottoponendo un edificio a spinte in avanti e indietro. L'edificio inizia così ad oscillare, deformandosi. Se la struttura è duttile, e quindi capace di subire grandi deformazioni, potrà anche subire gravi danni, ma non crollerà (Fabiatti, 1999).

Dopo un terremoto, per valutare la vulnerabilità degli edifici è sufficiente rilevare i danni provocati, associandoli all'intensità della scossa. Più complessa è invece la valutazione della vulnerabilità degli edifici prima che si verifichi un evento sismico. Per questa sono stati messi a punto metodi di tipo statistico, meccanicistico, o i giudizi esperti.

I metodi di tipo statistico classificano gli edifici in funzione dei materiali e delle tecniche con cui sono costruiti, sulla base dei danni osservati in precedenti terremoti su edifici della stessa tipologia. Questa tecnica richiede dati di danneggiamento dei passati terremoti, non sempre disponibili, e non può essere utilizzata per valutare la vulnerabilità del singolo edificio, perché ha carattere statistico e non puntuale.

I metodi di tipo meccanicistico utilizzano, invece, i modelli teorici che riproducono le principali caratteristiche degli edifici da valutare, su cui vengono studiati i danni causati da terremoti simulati.

Infine, alcuni metodi utilizzano i giudizi esperti per valutare il comportamento sismico e la vulnerabilità di predefinite tipologie strutturali, o per individuare i fattori che determinano il comportamento delle costruzioni e valutarne la loro influenza sulla vulnerabilità.

Per poter valutare la vulnerabilità degli edifici su tutto il territorio nazionale è necessario ricorrere a metodi statistici che utilizzano dati omogenei sulle caratteristiche degli stessi. Per il territorio italiano sono disponibili, per le applicazioni dei metodi statistici, i dati dei censimenti Istat sulle abitazioni (Figura 2-6) (Munari, 2010).



Figura 2-6 Conseguenze di un sisma su un edificio in muratura

2.3.3 L'esposizione

La maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione. Il primo obiettivo di un programma generale di protezione dai terremoti è la salvaguardia della vita umana. Per questa ragione è molto importante valutare il numero delle persone coinvolte, decedute e/o ferite. I motivi che causano la perdita di vite umane possono essere di diverso tipo: crollo di edifici, di ponti e altre costruzioni, ma anche incidenti stradali. A questi si aggiungono quelli legati a fenomeni innescati

dal terremoto, come frane, liquefazione dei terreni, maremoti, incendi. Da alcune statistiche svolte sui principali terremoti del mondo è stato rilevato che circa il 25% dei morti causati da un terremoto sono dovuti a danni non strutturali degli edifici (caduta di tramezzi, vetrate, cornicioni, tegole, ecc.) e a fenomeni indotti dal terremoto.

Generalmente è possibile stimare, con un certo margine di errore e specialmente per i terremoti più forti, quante persone sono rimaste coinvolte attraverso calcoli che si basano sul numero degli edifici crollati o danneggiati. Per poter fare queste stime sono necessarie alcune considerazioni su:

- a) numero delle persone che abitano negli edifici;
- b) orario del terremoto;
- c) possibilità di fuggire e/o proteggersi;
- d) tipo di coinvolgimento delle persone (morte o ferite subite);
- e) possibilità di morire anche successivamente alle attività di soccorso.

È molto difficile stimare con precisione le conseguenze di un terremoto in termine di vite umane nei diversi momenti del giorno e dell'anno. Il numero di persone che risiedono in un'abitazione, infatti, varia da Regione a Regione, dalla città alla campagna e dipende dalle dimensioni del nucleo familiare. Inoltre, durante il giorno, il numero delle persone presenti in un edificio dipende dal suo utilizzo. Ad esempio, negli uffici, la presenza è massima nelle ore centrali del giorno ed è pressoché nulla durante la notte. In un'abitazione di città invece, la presenza delle persone di sera e di notte è mediamente inferiore rispetto ad un'abitazione di campagna perché esistono più attività, ludiche e lavorative, che si svolgono in quegli orari e spesso fuori casa (Zuccaro et al., 2015). Il riferimento alla tipologia di edifici e ai relativi abitanti, comunque, può fornire una stima globale accettabile per terremoti violenti che interessino vaste aree (Figura 2-7).



Figura 2-7 Effetti del terremoto di L'Aquila del 2009 sul tessuto urbano di Onna

Altro aspetto rilevante dell'esposizione è la presenza in Italia di un patrimonio culturale inestimabile, costituito dall'edificato corrente dei centri storici, che ancora sfugge ad una quantificazione sistematica di consistenza e qualità. In questo caso il primo passo per la prevenzione e mitigazione del rischio sismico del patrimonio storico e architettonico è, ovviamente, la conoscenza dei beni esposti. È stato, perciò, avviato in collaborazione con il Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC) un censimento a scala nazionale dei centri storici esposti al rischio e lo sviluppo di un metodo di indagine conoscitiva della vulnerabilità dell'edificato storico, attraverso messa a punto di un apposito strumento web di rilievo, da condividere con tutte istituzioni competenti sul territorio (Ferrante & Berardi, 2007).

L'imprevedibilità dei terremoti individua una scala di priorità nella riduzione del rischio sismico, ponendo al primo posto la salvaguardia delle vite umane, successivamente le perdite economiche e infine il raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza sismica del patrimonio costruito. Tuttavia, le complesse problematiche poste da tale obiettivo, soprattutto di tipo economico, richiedono una serie di azioni diversificate che essenzialmente possono essere raggruppate in:

- 1) Azioni di previsione
- 2) Azioni di prevenzione

2.3.4 La previsione

Oggi la scienza non è ancora in grado di prevedere il tempo ed il luogo esatti in cui avverrà il prossimo terremoto. L'unica previsione possibile è di tipo statistico, basata sulla conoscenza della sismicità che ha storicamente interessato il nostro territorio e quindi sulla ricorrenza dei terremoti. Sappiamo quali sono le aree del nostro Paese interessate da una elevata sismicità, per frequenza ed intensità dei terremoti, e quindi dove è più probabile che si verifichi un evento sismico di forte intensità, ma non è possibile stabilire con esattezza il momento in cui si verificherà.

La previsione di tipo probabilistico consente di individuare le aree pericolose e di classificarle in funzione della probabilità che si verifichino forti terremoti e della frequenza con cui si possono aspettare. Per definire con maggiore precisione l'intervallo di tempo in cui in un dato luogo ci si può aspettare con maggiore probabilità un terremoto, occorrerebbe conoscere quanta energia si è accumulata nella struttura sismogenetica che può scatenare un terremoto in quel luogo e il modo in cui si libererà l'energia, cioè se un pò per volta con molte scosse di bassa magnitudo, oppure con pochi eventi molto forti. Ma anche attraverso lo studio approfondito delle

strutture sismogenetiche non saremmo in grado di stabilire il momento esatto in cui avverrà il prossimo terremoto.

Negli ultimi anni la scienza ha fatto notevoli progressi nello studio dei precursori sismici, ovvero di quei parametri chimici e fisici del suolo e del sottosuolo che subiscono variazioni osservabili prima del verificarsi di un terremoto. In futuro lo studio sistematico di questi precursori potrebbe consentire di fissare l'istante iniziale del terremoto anche se si dovranno evitare falsi allarmi, che potrebbero risultare ancora più dannosi.

La ricerca sui precursori di un terremoto si è concentrata su:

- precursori geofisici: anomalie delle velocità e delle caratteristiche delle onde sismiche P e S, variazioni delle caratteristiche magnetiche ed elettriche delle rocce e dell'atmosfera;
- precursori sismologici: prima di un grosso evento sismico si possono verificare una serie di microterremoti, rilevabili solo attraverso gli strumenti, o un cambiamento nella distribuzione della sismicità;
- precursori geodetici: modifiche nella quota, nella posizione, nell'inclinazione di parti della superficie del suolo e nella velocità degli spostamenti misurati;
- precursori geochimici: variazione della concentrazione nelle acque sotterranee e nei gas al suolo di alcuni elementi chimici radioattivi, tra cui il gas radon;
- precursori idrogeologici: variazione del livello della falda acquifera nel sottosuolo misurata nei pozzi.

Nonostante la comprensione del fenomeno e la conferma della validità del modello genetico del terremoto ipotizzato da sismologi, la previsione dei terremoti basata su precursori ha dato finora risultati deludenti e contraddittori. Nessun precursore si verifica regolarmente prima di ogni terremoto importante, per questo la ricerca si sta orientando verso l'osservazione contemporanea di più fenomeni.

2.3.5 La prevenzione

L'Ufficio III "Rischio Sismico e Vulcanico" del Dipartimento di Protezione Civile elabora i criteri e le metodologie per la valutazione del rischio sismico, sviluppa le competenze tecnico-scientifiche per la previsione dell'impatto del terremoto sul territorio e opera l'ottimizzazione degli interventi in condizioni di emergenza e di ricostruzione post-sima.

Inoltre, formula indirizzi in ordine alla classificazione sismica e alla normativa per le costruzioni in zona sismica, dà supporto tecnico ed assistenza alle altre amministrazioni centrali e periferiche dello Stato e monitora il territorio per determinare rapidamente le caratteristiche e gli effetti dei terremoti. Promuove e realizza iniziative di sensibilizzazione sui temi del rischio sismico e della prevenzione.

Questi compiti vengono svolti con il supporto scientifico e operativo dei centri di competenza per il rischio sismico: INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) per gli aspetti sismologici, ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) e Eucentre (Centro Europeo per la formazione e la ricerca in ingegneria sismica), per gli aspetti ingegneristici. Un'efficace strategia di mitigazione del rischio sismico richiede un costante impegno per migliorare le conoscenze sulle cause del fenomeno, approfondire gli studi sul comportamento delle strutture sottoposte alle azioni sismiche e migliorare gli interventi in emergenza.

Il rischio sismico, infatti, oltre che al verificarsi del fenomeno fisico, è indissolubilmente legato alla presenza dell'uomo. Poiché non è possibile prevedere il verificarsi dei terremoti, l'unica strategia applicabile è quella di limitare gli effetti del fenomeno sull'ambiente antropizzato, attuando adeguate politiche di prevenzione e riduzione del rischio sismico.

In particolare:

- migliorando la conoscenza del fenomeno, anche attraverso il monitoraggio del territorio e valutando adeguatamente il pericolo a cui è esposto il patrimonio abitativo, la popolazione e i sistemi infrastrutturali;
- attuando politiche di riduzione della vulnerabilità dell'edilizia più antica, degli edifici "rilevanti" (scuole, beni monumentali), degli "edifici strategici" (ospedali, strutture adibite alla gestione dell'emergenza), attraverso un'ottimizzazione delle risorse utilizzate per il recupero e la riqualificazione del patrimonio edilizio;
- aggiornando la classificazione sismica e la normativa;
- ampliando le conoscenze sulla consistenza e la qualità dei beni esposti a rischio;
- sviluppando studi di microzonazione sismica, di livello superiore al I, per un corretto utilizzo degli strumenti ordinari di pianificazione, per conseguire nel tempo un riassetto del territorio che tenga conto del rischio sismico per migliorare l'operatività e lo standard di gestione dell'emergenza a seguito di un terremoto;

- intervenendo sulla popolazione con una costante e incisiva azione di informazione e sensibilizzazione.

Resta comunque inteso che, per mitigare gli effetti di una scossa sismica è necessario ridurre i fattori di rischio, agendo in particolare sulla qualità delle costruzioni. La prevenzione (costruire bene) resta dunque l'unico modo efficace per ridurre le conseguenze di un terremoto.

2.4 La rappresentazione della pericolosità sismica dei centri storici minori

L'analisi dell'apparato urbanistico della penisola italiana evidenzia come il maggior numero di centri storici, più o meno abitati e costituenti il nostro patrimonio storico/artistico da preservare, è ubicato nelle zone a maggiore rischio sismico. I risultati dell'analisi si sono ottenuti grazie all'uso dell'**HT_GIS** in cui sono state importate le mappe della pericolosità sismica, redatte dall'INGV. Dalla lettura in overlay delle mappe di pericolosità sismica e di distribuzione dei centri storici minori, emerge che la maggiore concentrazione di tali realtà urbane si ha nelle zone ad elevata pericolosità sismica, ossia quelle dell'Appennino Centrale, della Campania e del Sud Italia: Aimè si trovano precisamente dove non dovrebbero essere!

Il risultato è ovvio se si pensa che molti di questi centri sono sorti in epoca medioevale e ubicati sui versanti o in cima ad alture più o meno significative le quali costituiscono gran parte della catena appenninica sorta proprio in seguito ai movimenti della crosta terrestre. Se si osserva, infatti, dalla Figura 2-8 emerge chiaramente che la maggiore concentrazione dei centri storici minori sono allocati nella *zona 1* (alta pericolosità sismica) e *zona 2* (elevata pericolosità sismica).

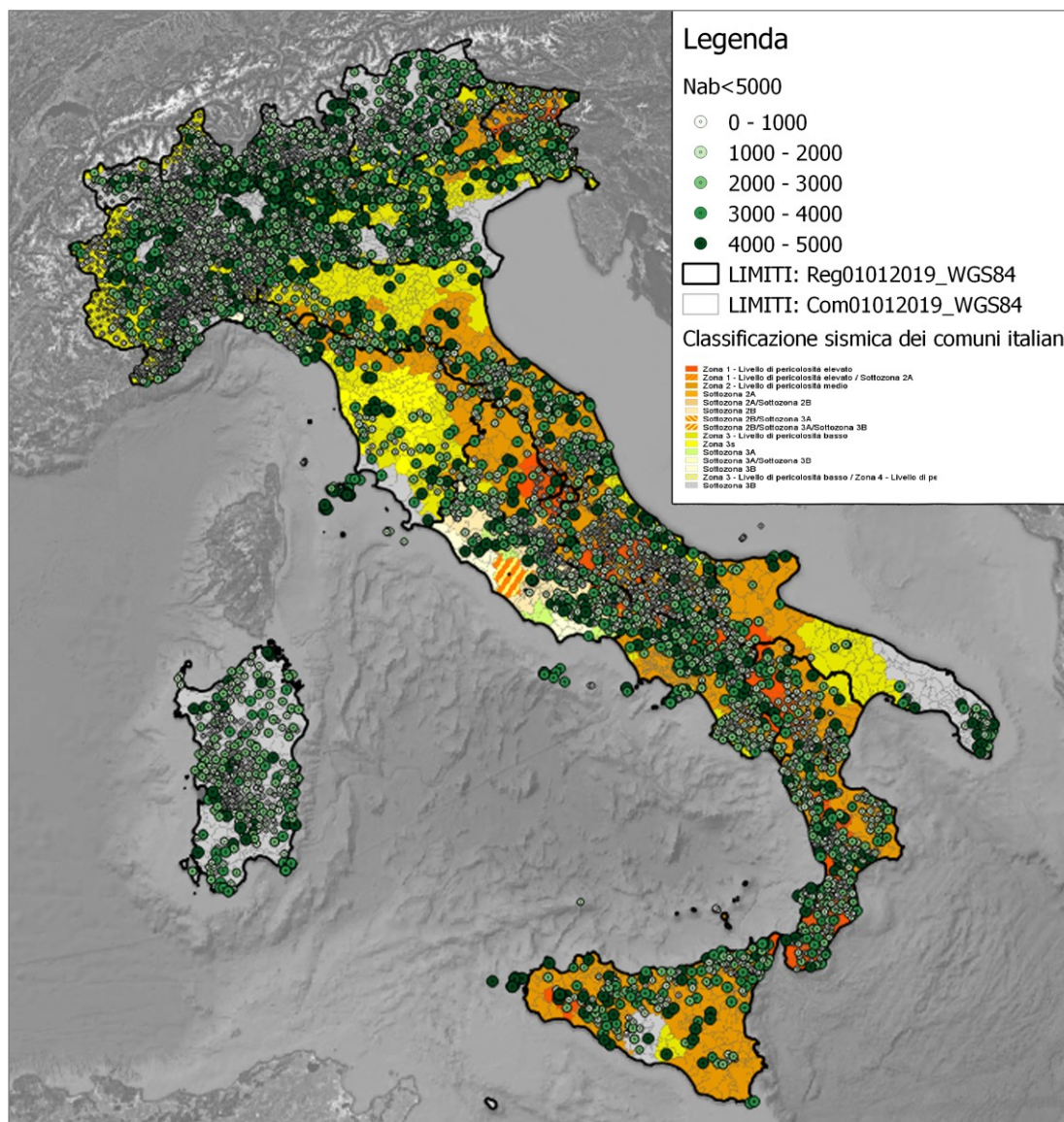


Figura 2-8 Distribuzione dei centri storici minori italiani in relazione alla carta di pericolosità sismica

2.5 Bibliografia

- Albarello, D., Azzaro, R., Barbano, M. S., D'Amico, S., D'Amico, V., Rotondi, R., ... & Zonno, G. (2007). Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito.
- Corradi, E., & Gritti, A. (2018). Il patrimonio delle comunità resilienti. Mappe e codici nell'Italia dei terremoti. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 15.
- Delladio, A. (2011). Monitoraggio sismico del territorio nazionale. *INGV*, 11.
- Fabietti, W. (Ed.). (1999). Vulnerabilità sismica e trasformazione dello spazio urbano (Vol. 8). Alinea Editrice.
- Ferrante, F., & Berardi, E. (2007). Metadati per il catalogo del patrimonio archeologico, architettonico, storico artistico ed etnoantropologico, il progetto Cultura online e CulturaItalia.
- Gisotti, G., & Benedini, M. (2000). Il dissesto idrogeologico: previsione, prevenzione e mitigazione del rischio. Rome, Italy: Carocci.
- Lucantoni, A., Bosi, V., Brammerini, F., De Marco, R., Lo Presti, T., Naso, G., & Sabetta, F. (2001). Il rischio sismico in Italia. *Ingegneria Sismica*, 1(2001), 5-36.
- Marchetti, A., Nardi, A., Margheriti, L., Latorre, D., Ciaccio, M. G., Lombardi, A. M., ... & Battelli, P. (2019). RAPPORTO BOLLETTINO SISMICO ITALIANO sulla revisione della sequenza sismica del centro Italia 24 agosto 2016-31 agosto 2018.
- Mele, F., Arcoraci, L., Battelli, P., Berardi, M., Castellano, C., Lozzi, G., ... & Rossi, A. (2010). Bollettino sismico italiano 2008. Quaderni di Geofisica.
- Munari, M. (2010). Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura.
- Peppoloni, S. (2014). Convivere con i rischi naturali. Società editrice Il Mulino, Bologna.
- Rizzolatti, P. (2016). Il terremoto nel mondo di Leonardo Zanier. *Oltreoceano*, 12, 59-72.
- Sabetta, F., & Paciello, A. (1995). Valutazione della pericolosità sismica. La Geologia di Roma. II Centro Storico. Mem. descrittive della CG d'It, 50-443.
- Stucchi, M., Camassi, R., Rovida, A., Locati, M., Ercolani, E., Meletti, C., ... & Azzaro, R. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei

terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. Quaderni di Geofisica.

Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., & Moroni, C. (2015). La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico. Proceedings of the GNGTS.

CAPITOLO 3.

IL RILIEVO E L'ANALISI SISMICA DEGLI EDIFICI IN MURATURA

3.1 Motivazione della ricerca

Come più volte ripetuto i nostri centri storici minori rappresentano l'identità culturale del nostro paese ma sono particolarmente vulnerabili perché allocati in aree di maggiore pericolosità sismica e perché molto eterogenei strutturalmente a causa di importanti modificazioni subite nel corso dei secoli.

La riduzione del rischio delle architetture, in muratura portante, che compongono tali centri è un'operazione complessa che richiede un livello di conoscenza globale, in alcuni casi impossibile da ottenere perché non si è in grado di individuare tutte le trasformazioni subite ed i materiali usati per attuarle. È oltremodo complesso perché nel corso dei secoli spesso le componenti strutturali si sono intersecate trasformando singole unità edilizie in aggregati strutturali con disallineamenti di orizzontamenti interni, superfetazioni, ammorsamenti etc.

Nel corso degli anni sono state messe a punto numerose procedure per comprendere il comportamento di questi edifici quando sono sollecitati sismicamente. Queste procedure, pensate nella maggior parte dei casi in seguito ad eventi sismici significativi, forniscono una conoscenza generale sull'intero nucleo urbano definendo livelli di vulnerabilità. D'altro canto la normativa sismica introdotta in Italia sin dal 1984 indica una serie di analisi in grado di fornire alcune informazioni sul comportamento sismico degli edifici in muratura articolate in modo complesso e di non facile esecuzione.

Con questa consapevolezza l'obiettivo della ricerca è quello di individuare una procedura di conoscenza che possa fornire dati sufficienti a ottenere il più probabile cinematisma locale di collasso di un edificio in muratura, in modo semplice ma mirato all'attuazione di interventi di prevenzione e quindi di mitigazione del rischio.

Per raggiungere tale obiettivo è stata necessaria la definizione di uno strumento integrato multilivello, realizzato in BIM, in grado di gestire, analizzare e rappresentare la molteplicità, eterogeneità e complessità dei dati che occorrono per la definizione della vulnerabilità sismica dei singoli edifici in muratura costituenti i centri storici.

L'eterogeneità costruttiva di tali agglomerati, come già ampiamente esposto, rende l'analisi complessa basata su una stretta interrelazione tra il rilievo e l'analisi strutturale. Per questo motivo lo studio dello stato dell'arte, fondamentale per la definizione dello strumento, ha analizzato il campo del rilievo, mettendo in evidenza le più recenti tecnologie e procedure di conoscenza, e dell'analisi strutturale degli edifici in muratura.

3.2 Il comportamento sismico degli edifici in muratura

Per condurre un'adeguata analisi strutturale è fondamentale ripercorrere il comportamento sismico che gli edifici in muratura possono assumere in seguito ad un evento significativo.

Dalla letteratura, un edificio in muratura “eseguito a regola d'arte”, per effetto di un evento sismico, può giungere al collasso per meccanismi nel piano o per meccanismi fuori piano (Figura 3-1). Quando, invece, la fattura della muratura è di qualità scadente, l'edificio tende al collasso puntuale per disgregazione. I meccanismi nel piano, anche detti di II modo, sono innescati da azioni sismiche che agiscono parallelamente al piano medio della muratura. Essi si manifestano in presenza di un comportamento ‘scatolare’ dell'edificio, assicurato da efficaci connessioni tra le pareti e tra le pareti e gli orizzontamenti che lo compongono (Lenza, Ghersi & Calderoni, 2011).

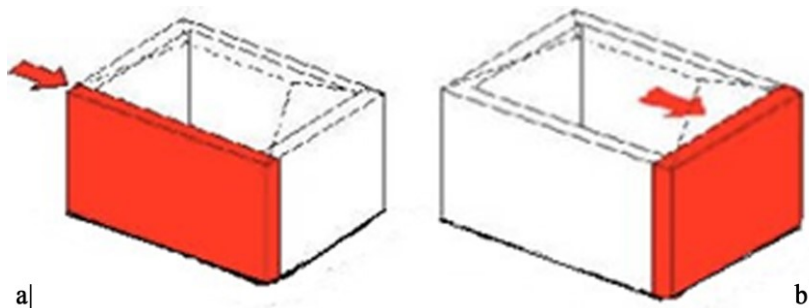


Figura 3-1 Meccanismi: a) nel piano e b) fuori piano

Di contro, i meccanismi fuori piano, denominati anche di I modo, sono provocati da azioni sismiche agenti perpendicolarmente al piano medio della muratura. Essi si verificano quando viene meno il comportamento 'scatolare' e interessano singole porzioni dell'edificio, che collassano senza trascinare con sé le parti adiacenti. Gli edifici in muratura dei centri storici raramente mostrano un comportamento 'scatolare', tant'è che, accertata la monoliticità della parete muraria in presenza di azioni, essi vanno verificati, oltre che nei confronti dei meccanismi nel piano, anche nei riguardi dei meccanismi fuori piano (NTC 2018, 2018).

3.2.1 I meccanismi di collasso fuori piano

I meccanismi fuori piano, oggetti del presente lavoro di tesi, comportano il collasso del paramento murario per perdita di equilibrio, dovuta a fenomeni di ribaltamento o flessione fuori dal proprio piano. Tra di essi è possibile distinguere quattro principali tipologie di meccanismi:

- ribaltamento semplice;
- ribaltamento composto;
- flessione orizzontale;
- flessione verticale.

L'attivarsi di un meccanismo, anziché di un altro, dipende dalla geometria e dalla condizione di vincolo della parete interessata dal meccanismo. Costituiscono fattori favorevoli all'attivazione di un dato meccanismo le condizioni di carico, la presenza di carenze costruttive o vulnerabilità specifiche, dovute ad esempio a processi di trasformazione edilizia, a degrado strutturale, a dissesti preesistenti.

Ribaltamento semplice

Il meccanismo di ribaltamento semplice coinvolge le pareti esterne disposte ortogonalmente all'azione sismica agente. Si manifesta con la formazione di una cerniera cilindrica orizzontale e conseguente rotazione fuori dal piano del blocco di parete al di sopra della cerniera, assimilato ad un corpo rigido. Nel caso in cui il blocco ribaltante coincida con l'intera parete, si ha ribaltamento globale (Figura 3-2 a)), viceversa si ha ribaltamento parziale (Figura 3-2 b)), che può interessare uno o più livelli della parete o una sua parte di geometria variabile in funzione delle bucatore presenti su di essa.

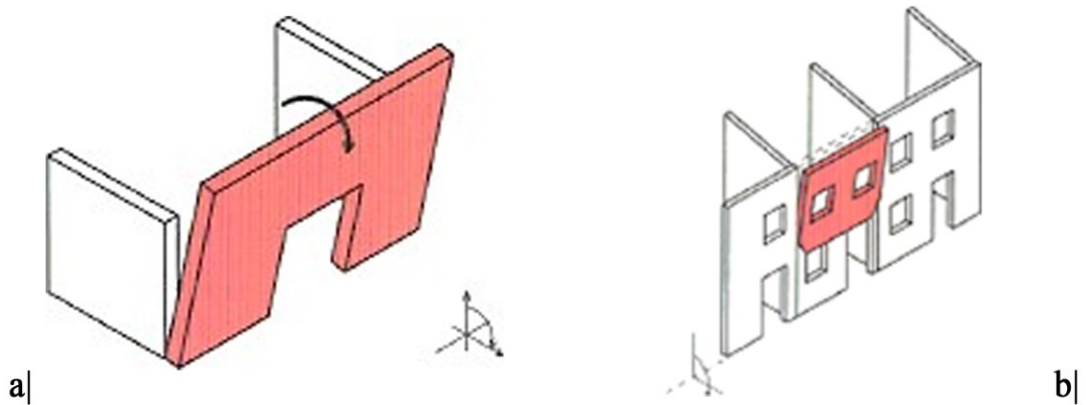


Figura 3-2 Ribaltamento semplice: a) globale e b) parziale

L'attivazione di tale meccanismo è dovuta all'assenza di un adeguato vincolo in sommità (cordoli, catene) e alla mancanza o scarsa efficacia di ammortamenti con le pareti ortogonali (Figura 3-3) (Milano et al., 2008).

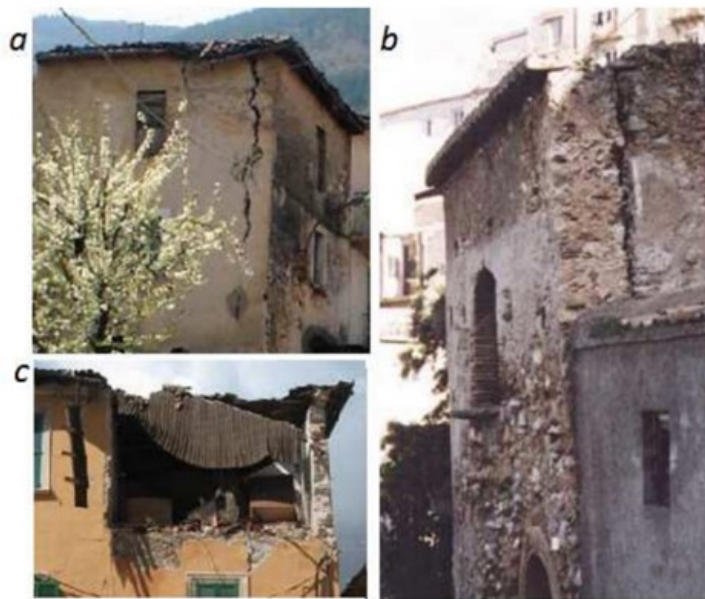


Figura 3-3 Esempi di meccanismi di ribaltamento semplice su edifici in muratura

Ribaltamento composto

Il meccanismo di ribaltamento composto prevede la rotazione rigida, intorno ad una cerniera cilindrica orizzontale, oltre che della parete ortogonale all'azione sismica, anche di cunei di muratura delle pareti ad essa ortogonali e contigue. Generalmente si attinge quando la parete soggetta all'azione sismica fuori dal piano è libera in sommità ma ben ammortata alle murature ad essa ortogonali. Risulta essere favorito

dall'eventuale presenza di coperture spingenti e dalla scadente qualità muraria delle pareti trasversali.

La geometria del cuneo di distacco, dipende dalla presenza o meno di aperture nelle pareti attive in prossimità dell'angolata e dalla tipologia e qualità muraria: all'aumentare della qualità muraria aumenta l'angolo di inclinazione del cuneo di muratura coinvolto nel ribaltamento. In particolare, i cunei di distacco possono essere diagonali, se il ribaltamento avviene in corrispondenza dell'ultimo livello, o a doppia diagonale, in presenza di orizzontamenti rigidi. Come il ribaltamento semplice, anche quello composto può essere globale (Figura 3-4 a), se interessa l'intera parete passiva, o parziale (Figura 3-4 b), se coinvolge uno o più livelli di essa. Un ulteriore meccanismo di ribaltamento composto è il cosiddetto ribaltamento del cantonale (Figura 3-4 c). In quest'ultimo caso, il cuneo di distacco è costituito dalle due porzioni di parete, delimitate da superfici di frattura diagonali, che si intersecano nell'angolata libera. È questo un meccanismo che si riscontra spesso in edifici con tetti a padiglione (Figura 3-5) (Milano et al., 2008).

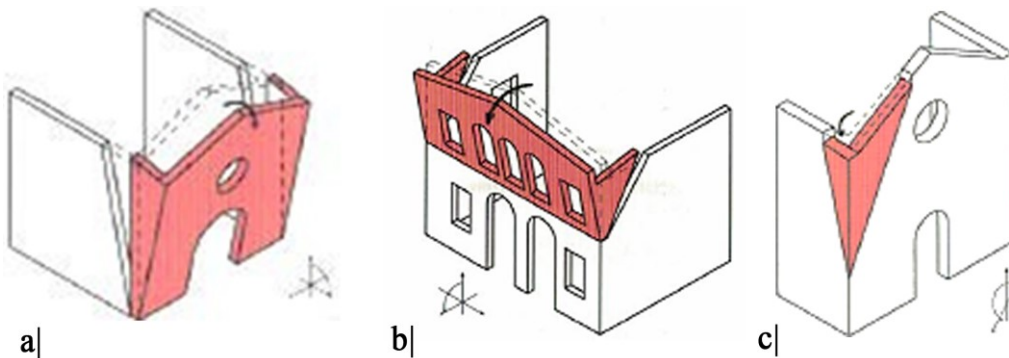


Figura 3-4 Ribaltamento composto: a) globale; b) parziale; c) del cantonale



Figura 3-5 Esempi di meccanismi di ribaltamento composto su edifici in muratura

Flessione verticale

Il meccanismo di flessione verticale (Figura 3-6) si manifesta con lo “spanciamento” in verticale della parete dovuto alla formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete in due blocchi, che ruotano intorno alla cerniera a causa di un'azione ortogonale alla parete. Per comprendere l'attivazione del meccanismo si immagina la formazione di un arco ideale resistente verticale a tre cerniere nello spessore della parete, una in mezzeria e le altre due in prossimità del piano superiore e del piano inferiore. L'arco ideale verticale resiste alla forza orizzontale fino a quando la muratura non cede per schiacciamento. A questo punto il cinematismo si innesca per formazione di cerniera plastica in mezzeria. Tale meccanismo può verificarsi se la parete investita dall'azione sismica risulta efficacemente vincolata solo in sommità (ad esempio con cordoli o tiranti) e libera nelle zone intermedie. Il meccanismo è favorito dalla presenza localizzata di spinte orizzontali, dovute ad archi o volte, o dall'azione di martellamento di un solaio che va a punzonare la muratura.

Anche in questo caso come nei precedenti casi di ribaltamento semplice e composto, il cinematismo può interessare uno o più livelli dell'edificio e può essere influenzato dalla presenza di aperture. Può inoltre riguardare l'intero spessore della parete, o il solo paramento esterno nel caso di pareti a doppia cortina in cui la cortina interna risulti vincolata dal solaio interpiano (Figura 3-7) (Milano et al., 2008).

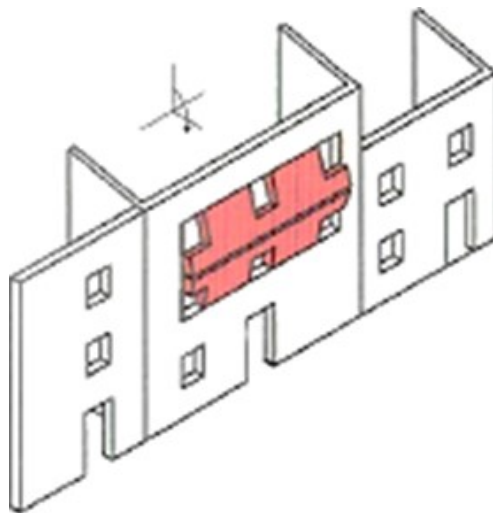


Figura 3-6 Flessione verticale



Figura 3-7 Esempi di meccanismi di flessione verticale su edifici in muratura

Flessione orizzontale

Il meccanismo di flessione orizzontale si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete, in seguito alla formazione di cunei di distacco rigidi, che ruotano attorno a cerniere cilindriche oblique e verticali reciprocamente (Figura 3-8).

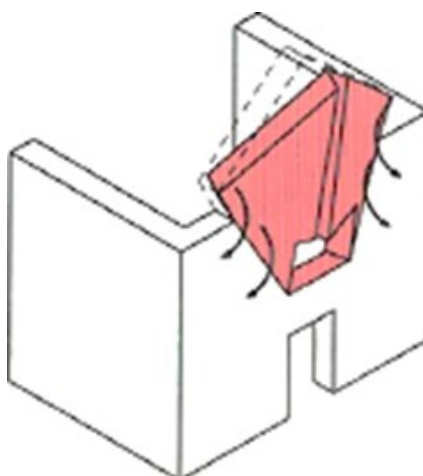


Figura 3-8 Flessione orizzontale



Figura 3-9 Esempi di meccanismi di flessione orizzontale su edifici in muratura

L'attivazione del meccanismo è riconoscibile dall'osservazione di un quadro fessurativo composto da lesioni in corrispondenza delle cerniere cilindriche verticali ed oblique, e dal distacco della copertura dalla parete. Può verificarsi nel caso di pareti efficacemente vincolate alle pareti ortogonali (ad esempio per effetto di catene disposte in prossimità delle pareti di controvento o per la presenza di un buon ammorsamento nei cantonali), ma libere in sommità. Tale meccanismo può essere favorito dalla presenza localizzata di spinte in copertura, dalla presenza di elementi che indeboliscono la sezione muraria, come ad esempio le canne fumarie, oppure aperture disposte in modo da favorire il cinematismo, da significative luci libere della parete e dalla cattiva qualità muraria. È questo un meccanismo che può determinarsi in pareti di edifici non confinate nei confronti di spostamenti nella direzione parallela al piano della parete o in pareti di edifici in continuità con quelle degli edifici contigui, che le confinano efficacemente nei riguardi degli spostamenti suddetti, come nel caso degli edifici in aggregato. Nel primo caso, detto flessione orizzontale di parete monolitica non confinata, il collasso si ha per instabilità dovuta all'allontanamento delle pareti di controvento. Nel secondo caso, indicato come flessione orizzontale di parete monolitica efficacemente confinata, la crisi sopraggiunge per crisi del materiale per schiacciamento. Il meccanismo può coinvolgere la parete in tutto il suo spessore o il suo solo paramento esterno, nel caso di pareti a doppio paramento (Figura 3-9) (Milano et al., 2008).

3.3 Il rilievo e l'analisi degli edifici in muratura: stato dell'arte

Il rilievo, preposto allo scopo di fornire un quadro conoscitivo a diversi livelli in funzione dell'analisi sismica che si vuole condurre, può seguire due differenti procedure: diretta-speditiva e strumentale-di dettaglio.

Analogamente, le analisi strutturali degli edifici in muratura possono essere strutturate al fine di fornire una risposta sul comportamento sismico globale, ottenendo informazioni generali della vulnerabilità del costruito, oppure locale, restituendo informazioni specifiche sul comportamento cinematico del singolo edificio.

3.3.1 Il rilievo

Per eseguire le analisi sugli edifici in muratura esistenti, come già detto, è necessario conoscere l'architettura e la struttura con cui essi si conformano. La conoscenza di un edificio esistente parte necessariamente dal rilievo dello stato di fatto in cui si trova. Solo tramite procedure e strumenti adatti allo scopo è possibile realizzare modelli ed applicare metodologie per l'analisi delle murature. Per tale motivo, in questo paragrafo si vuole effettuare una rapida disamina dei principali strumenti, tecniche e tecnologie attualmente utilizzate per l'esecuzione dei rilievi e le principali metodologie per l'analisi della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in muratura.

Nel corso dei secoli il rilievo ha strutturato due diverse ma complementari procedure: il rilievo diretto e il rilievo strumentale (indiretto) (Docci & Maestri, 1984).

Il rilievo diretto, rimasto sostanzialmente invariato nel corso degli anni ma senza per questo aver perso la sua validità negli ambiti in cui è necessario, utilizza strumenti semplici ed economici. Il rilievo strumentale, basato su l'uso di tecnologie avanzate è in continua evoluzione poiché è strettamente correlato all'evoluzione del mercato tecnologico (stazioni totali, distanziometri laser, GPS, computer, ecc.) e informatico (software di elaborazione e post processing) (Bini & Bertocci, 2012).

Senza entrare nel merito di procedure ampiamente trattate in letteratura è invece interessante soffermarsi sul metodo indiretto attualmente più utilizzato, sia per economicità che per velocità di esecuzione: la fotogrammetria digitale. Basata sulla misurazione attraverso la luce, la fotogrammetria in generale è una tecnica che sfrutta l'analisi di una coppia di fotografie stereometriche, ottenute tramite scatti con la camera posta in due posizioni tali da consentire di rilevare forma, posizione e dimensioni dell'oggetto fotografato facendo ricorso alla stereoscopia artificiale.

Questa tecnica di rilievo affonda le sue radici nella geometria descrittiva. Le prime applicazioni pratiche dei principi geometrici risalgono al 1849 e al 1858 i primi esempi di fotogrammetria aerea. In quasi 160 anni, per quanto le regole geometriche alla base di questa tecnica non siano mutate, molti passi avanti sono stati fatti nella pratica: da tempo è stata abbandonata la necessità di fare ricorso a camere metriche, grazie all'introduzione del digitale e ad algoritmi informatici in grado di analizzare le fotografie scattate da una macchina digitale. Il più famoso algoritmo di questo tipo è noto con il nome di *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), particolarmente utilizzato in *Computer Vision* (CV) per rilevare e descrivere caratteristiche di un'immagine: nota come "fotogrammetria digitale automatica" è una metodologia che permette di elaborare un modello tridimensionale partendo da fotografie digitali e consente di ottenere una nuvola di punti (dense cloud) in coordinate x, y, z. Si tratta di una tecnologia oggi molto diffusa per realizzare modelli tridimensionali in svariati ambiti: topografia, architettura, archeologia, geologia, medicina, grafica, ecc. La sua grande diffusione è dovuta alla disponibilità di software specifici a basso costo, alla loro semplicità d'uso e alla necessità di una strumentazione di base composta da una macchina fotografica digitale e un PC di medie prestazioni. Mentre la fotogrammetria tradizionale implica un intervento manuale consistente dell'operatore per elaborare le immagini, quella automatica ha automatizzato tutti i procedimenti. Il termine "fotogrammetria automatica" è stato introdotto di recente nella letteratura specialistica: fino a poco tempo fa si cercava di mantenere ben separata la fotogrammetria tradizionale dalle tecniche di elaborazione automatica, per le quali si parlava di fotomodellazione (Brusaporci, 2010).

Nella letteratura scientifica in lingua inglese è comunemente diffuso il termine *Image-Based Modeling and Rendering*, al quale si è affiancato il termine *automatic* (talvolta *automated*) *photogrammetry*. A volte, si parla anche di *Structure-from-Motion*, sebbene questa dicitura sia imprecisa, in quanto riguarda solamente la prima parte del processo di elaborazione delle immagini (*image matching* e *sparse reconstruction*) (Bolognesi, 2016). Trattandosi di fotogrammetria basata su analisi d'immagine, quindi CV, decadono molti stretti principi che sono alla base della fotogrammetria "tradizionale", come ad esempio la necessità di avere una camera metrica: di fatto qualsiasi set di almeno 3 immagini, 5 consigliate, è in grado di restituire un modello 3D scalabile e reso realistico con l'applicazione di texture, naturalmente a discapito dell'accuratezza, decisamente inferiore. Fortunatamente il digitale ci viene in aiuto: utilizzando profili standard o calcolando la distorsione di camere prodotte in serie, si possono eliminare gran parte dei problemi di distorsione

che rendevano poco accurato il livello di precisione della CV in ambito fotogrammetrico. Come detto in precedenza, le immagini per essere accoppiate stereometricamente devono essere scattate da posizioni precise. Inoltre affinché gli algoritmi di CV siano in grado di individuare le *features* (ovvero le caratteristiche) omologhe è necessario che uno stesso oggetto sia inquadrato in più immagini da posizioni diverse. In questo modo l'algoritmo non fa altro che ricostruire la tridimensionalità della scena in base al movimento della camera, secondo una tecnica che da questo assunto prende il nome di *Structure from Motion* o SfM. Tipicamente le foto verticali devono garantire almeno una sovrapposizione del 60% circa tra immagini successive e tra strisciate una sovrapposizione laterale del 20%, con identica scala e possibilmente con identico tono (ovvero simile radiometria dell'immagine, anche se gli algoritmi di tipo SIFT sono poco influenzati dal tono dell'immagine) (Paris, 2012). Poiché manualmente è complesso ottenere in maniera corretta un tale livello di precisione nel caso di fotogrammetrie aeree per centinaia di metri di volo, sono di ausilio le numerose applicazioni compatibili con i *mobile devices* utilizzati per pilotare i droni, in grado di impostare il volo automatico su percorso e *waypoint* (cioè punti di riferimento) del nostro drone (Inflight, etc.). Si disegna a schermo la porzione di territorio da sorvolare per la ripresa e l'app calcolerà automaticamente le linee di volo e la frequenza di scatto per garantire il corretto livello di sovrapposizione delle immagini (Pelliccio et al., 2017).

Oltre alla fotogrammetria digitale, tra le tecniche di rilievo indiretto più sviluppate vi è sicuramente la scansione laser 3D, che rispetto alla precedente è sicuramente più costosa e richiede un elaborato post processing. La tecnologia laser scanner 3D permette di acquisire digitalmente posizione e forma di oggetti, descrivendoli attraverso una nuvola di punti, per ciascuno dei quali viene individuata la posizione spaziale secondo un sistema di coordinate x, y e z, incentrato sulla posizione dello scanner. Lo strumento, generando un impulso laser infrarosso, rileva l'intervallo esistente tra l'emissione del segnale e l'impulso di ritorno. Nota la direzione del raggio nello spazio, rispetto ad un sistema di riferimento relativo, interno allo strumento stesso, è poi possibile posizionare ogni punto rilevato nello spazio georeferenziato per mezzo di punti noti. Allo stesso tempo ad ogni punto viene associato un valore di riflettanza, che dipende dalle caratteristiche dei materiali rilevati ed identificato attraverso un parametro cromatico RGB (Pera et al., 2016). Essendo un segnale luminoso, il laser colpisce la superficie da rilevare secondo l'angolo dettato dal punto di vista, ragione per cui per una completa descrizione dell'oggetto sono necessarie più scansioni. Queste poi vengono unificate per mezzo di una rete di target

opportunamente posizionati, a ciascuno dei quali vengono assegnate, attraverso un classico rilievo topografico di precisione, le coordinate riferite al sistema prescelto. Rispetto ad altre tecniche di rilievo, il rilievo con laser scanner non ha carattere soggettivo (non vengono cioè prescelti soltanto alcuni punti caratteristici dell'oggetto da rilevare) ma oggettivo, riferendosi quindi a tutto quanto risulti presente nel range d'azione del segnale inviato dallo strumento laser scanner 3D. Questa tecnologia presenta numerosi vantaggi. Il primo di sicuro è l'elevato dettaglio dell'acquisizione digitale 3D. Il vantaggio competitivo di un rilievo laser rispetto ad un tradizionale rilievo topografico o con fotogrammetria è quello di ottenere un'informazione sia geometrica che fotografica per sua natura continua, completa e metricamente rigorosa dell'oggetto. Con questo tipo di tecnologia l'informazione geometrica è molto più significativa e preziosa del mapping fotografico in quanto riproduce con estrema accuratezza e in tre dimensioni la topologia dell'oggetto. Inoltre il raggio laser ha diversi valori di riflettanza a seconda del tipo di materiale che incontra, questi diversi valori si traducono in una variazione del valore cromatico dei punti acquisiti. Grazie a questa proprietà se si imposta una visualizzazione in scala di grigio si otterrà una percezione della nuvola come se fosse effettivamente mappata con una texture fotorealistica in bianco e nero ad altissima risoluzione e la lettura interpretativa risulterà estremamente agevole e potenziata (Bartolucci, 2009). La sovrapposizione è estremamente precisa fra geometria e mappatura fotografica, soprattutto nel caso in cui quest'ultima sia stata acquisita ad alta risoluzione e successivamente ortorettificata. In tal caso il valore cognitivo e rappresentativo del modello viene ulteriormente incrementato. Questa tecnologia consente la possibilità, attraverso l'analisi del modello virtuale, di identificare e studiare l'oggetto sia da un punto di vista topologico che conservativo, avanzando interpretazioni critiche. Consente inoltre la possibilità di elaborare il modello tridimensionale a varie scale di dettaglio, in base ai tipi di utilizzo e agli obiettivi che si vogliono perseguire. Questa applicazione si rivela particolarmente adatta per il rilievo e la rappresentazione spaziale di manufatti particolarmente complessi o situazioni altrimenti difficilmente documentabili, in ragione della loro complessità o estrema irregolarità, difficilmente raggiungibili o addirittura inaccessibili nonché particolarmente fragili o sensibili al contatto. La tecnologia laser scanner trova un'applicazione molto efficace negli ambiti dell'urbanistica e della riqualificazione urbana, partendo dalla scala territoriale per arrivare ai centri storici. La possibilità di collegare tra loro scansioni diverse in successione, permette la riproduzione di vaste aree di territorio. Tale tecnologia, inoltre, si dimostra particolarmente adatta per il rilievo di fabbricati complessi o di

difficile accesso, nonché edifici a carattere monumentale e di pregio storico. Le caratteristiche tecniche del laser scanner lo rendono ottimale nell'applicazione per il rilievo 3D a supporto dell'ingegneria civile, meccanica e industriale. Studi morfologici e geologici, rilievi *as built* di infrastrutture, opere d'arte, macchinari, impianti industriali, monitoraggi sono solo alcuni dei molteplici campi di impiego di tale tecnologia (Paris, 2010).

3.3.2 Metodi empirici per la valutazione della vulnerabilità sismica

I dati forniti dal rilievo, secondo le procedure precedentemente trattate, costituiscono la base delle analisi strutturali degli edifici esistenti. È necessario però porre l'attenzione sui metodi empirici, che da circa un secolo si stanno presentando e attuando sul nostro territorio nazionale, che presentano significative limitazioni, e sulle procedure di analisi che restituiscono in modo più o meno complesso misure quantitative della vulnerabilità sismica degli edifici.

In letteratura sono stati analizzati i *principali metodi empirici* per il campo di ricerca: basati sull'analisi di grandi campioni di costruzioni soggette ad un sisma e sulla base dati di osservazione empirica relativa alle caratteristiche generali delle costruzioni e ai danni registrati a seguito di fenomeni sismici di una data intensità, la maggior parte di questi metodi stabiliscono relazioni tra la tipologia edilizia, l'intensità sismica ed il livello di danneggiamento. Tra i metodi empirici ricadono anche quelli basati sul giudizio di esperti dove vengono effettuate valutazioni qualitative o quantitative di fattori che governano la risposta sismica e relative elaborazioni basate sulla conoscenza di esperti. Nella Figura 3-10 sono sintetizzati i più importanti metodi introdotti nell'ultimo secolo.

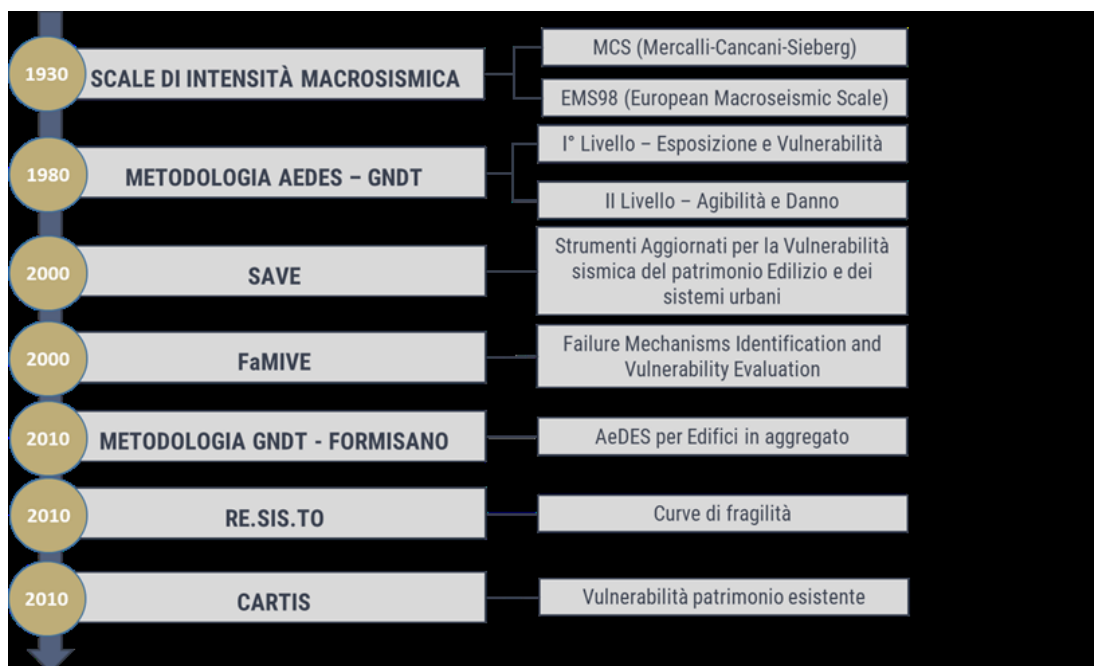


Figura 3-10 Metodi di analisi della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti

Di seguito sono illustrati alcuni fra i metodi più utilizzati.

Le scale di intensità macrosismica

La misura dell'intensità di un terremoto, come è noto, viene effettuata mediante misure strumentali o con classificazioni empiriche degli effetti del sisma. Le prime si riferiscono alla misura dell'intensità sismica alla sorgente (magnitudo) e alla valutazione del moto sismico del suolo in un punto distante dalla sorgente (PGA: Peak Ground Acceleration). Prima dell'utilizzo degli strumenti di misura l'intensità dei terremoti veniva valutata attraverso il metodo della 'classificazione d'intensità macrosismica'. Questo metodo viene tuttora largamente utilizzato e fornisce una descrizione degli effetti di danneggiamento provocati dai terremoti. Le scale di intensità macrosismica classificano quindi la severità di un sisma secondo una scala espressa in gradi basata sui danni riscontrati prevalentemente sulle strutture civili.

La prima scala macrosismica introdotta nel 1930 è stata la *Mercalli-Cancani-Sieberg* (MCS, 1930). Nello stesso anno negli Stati Uniti d'America è stata introdotta la scala Mercalli Modificata (MM, 1930), aggiornata poi nel 1956 con l'introduzione della valutazione della vulnerabilità degli edifici e non solo la vulnerabilità geomorfologica. Dal 1964 vengono pubblicate le tre edizioni della *Mendeleev-Sponheuer-Kàrník* (MSK, 1964, 1976 e 1981) utilizzate soprattutto in Europa, e dal 1993 le due edizioni della recente *European Macroseismic Scale* (EMS, 1992 e 1998).

Quest'ultima viene proposta nel 1992 dalla Commissione Sismologica Europea e resa definitiva con alcune modifiche nel 1998 (Grünthal, 1998).

La scala EMS 98 individua le classi di vulnerabilità suddividendole in relazione alla tipologia strutturale: edifici in muratura, edifici in cemento armato, edifici in acciaio o in legno. Per ciascuna tipologia strutturale sono individuate delle ulteriori sotto-tipologie in relazione alla tipologia di orizzontamento, per gli edifici in muratura, ed in relazione al grado di progettazione sismica, per gli edifici in cemento armato. Per ciascuna tipologia di edifici è possibile individuare la classe di vulnerabilità (Figura 3-11). Nella stessa figura con la linea è individuata una classificazione alternativa in relazione a determinate caratteristiche dell'edificio che possono ridurre o aumentare la sua vulnerabilità.

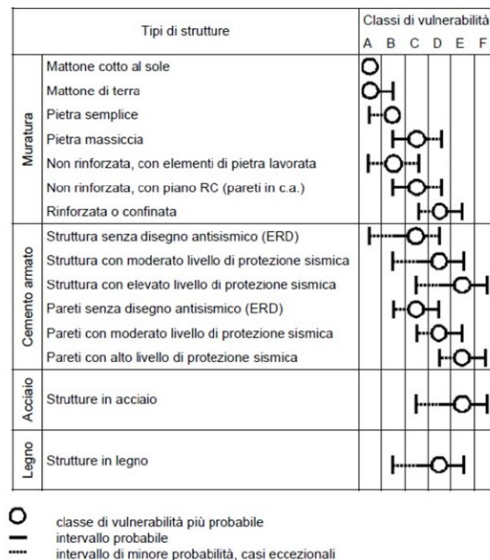


Figura 3-11 Classi di vulnerabilità della scala EMS-98

L'analisi della vulnerabilità attraverso l'uso della scala EMS 98 consiste quindi nella compilazione di una tabella che va confrontata con tabelle che riportano percentuali di danno relative a varie tipologie di edifici e la loro corrispondenza con i gradi di intensità sismica. Si possono utilizzare le stesse tabelle, al contrario, per fare stime sui possibili danni relativi ad un sisma ad una data intensità. In tal modo è possibile risalire alla vulnerabilità del costruito.

Le curve di fragilità

Lo studio della vulnerabilità degli edifici comporta la stima del grado di danno atteso per ogni livello d'intensità sismica. Il modo concettualmente più chiaro di eseguire tale valutazione è la costruzione delle curve di fragilità per il particolare

sistema strutturale analizzato. In generale una curva di fragilità rappresenta la probabilità che l'edificio raggiunga un particolare stato limite al variare dell'intensità sismica (Polese, 2002).

La curva di probabilità quindi può essere rappresentata con una funzione di probabilità condizionata $P[SL|I]$ dove $SL|I$ rappresenta il raggiungimento di uno stato limite SL per il valore dell'intensità sismica I (che può essere rappresentata dalla PGA, PGV, accelerazione spettrale, etc.) (Figura 3-12).

Bisogna distinguere il caso in cui l'oggetto di studio è un singolo edificio dal caso in cui si vuole studiare una tipologia edilizia. Nel primo caso, data la completezza e l'esattezza dei dati di input, è possibile spingersi a livelli di dettaglio molto elevati e ricavare curve di fragilità per noti livelli di danno in modo analitico, ovvero realizzando simulazioni numeriche sulla risposta sismica dell'edificio. Nel secondo caso, invece, si studia un edificio 'caratteristico' della tipologia edilizia rappresentato da macro-parametri quali ad esempio la forma, le dimensioni, l'anno di costruzione, il numero di piani, etc. Per tale motivo le curve di fragilità di classi tipologiche di edifici devono essere costruite empiricamente attraverso un'analisi statistica dei dati riguardanti il comportamento degli edifici riconducibili alla classe analizzata.

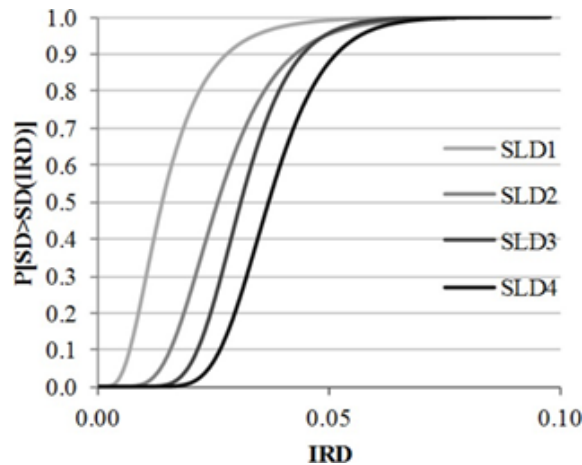


Figura 3-12 Esempio di curva di fragilità

Le matrici di probabilità di danno

Le matrici di probabilità di danno (DPM: Damage Probability Matrix), sono delle matrici generate per categoria di edifici ed esprimono la probabilità che si verifichi un certo livello di danno per ogni intensità sismica (Braga et al., 1982). Furono introdotte a seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980. La valutazione della vulnerabilità strutturale con il metodo delle matrici di probabilità di danno è di tipo quantitativo,

tipologico, statistico e diretto. Tipologico poichè valuta il comportamento sismico delle costruzioni attraverso l'attribuzione delle stesse ad una certa tipologia strutturale. Statistico poichè il risultato è ottenuto attraverso l'elaborazione statistica di dati osservati e rilevati dopo eventi sismici. Diretto poichè fornisce il risultato come previsione tra l'intensità del sisma e la probabilità di danneggiamento degli edifici. La scala MSK 76 (Mendelev 1977) rappresenta la prima forma di DPM, generata per le tre categorie di costruzioni individuate. Infatti gli edifici sono distinti in tre classi di vulnerabilità individuate in base al materiale costruttivo (A pietrame, B mattoni, C armate). Il livello di danno è invece distinto in 6 gradi (da nessun danno al collasso dell'edificio).

Il formato generale di una DPM è quello mostrato nella tabella in Figura 3-13. Ogni elemento della matrice rappresenta la probabilità condizionata che si verifichi il livello di danno D_k data l'intensità I e la classe tipologica T . Le DPM possono essere ricavate facendo riferimento a dati di danno osservato o per via analitica; in quest'ultimo caso ci si riconduce alla costruzione di vere e proprie curve di fragilità, sia pure in forma discreta, per ciascuna categoria di edifici.

Intensità	Livello di Danno					
	0	1	...	D_k	...	$D_{k_{max}}$
VI	...%	...%	...%	...%	...%	...%
...	...%	...%	...%	...%	...%	...%
I	...%	...%	...%	$p[D_k I,T]$...%	...%
...	...%	...%	...%	...%	...%	...%
I_{max}	...%	...%	...%	...%	...%	...%

Figura 3-13 Esempio di DPM

Il metodo Risk-UE

Nell'ambito del progetto europeo denominato 'Risk-UE' (Mouroux et al., 2004) intitolato 'An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns', è stata proposta una metodologia per la riduzione delle perdite provocate dal terremoto e per la generazione di piani d'azione per la mitigazione del rischio sismico.

La metodologia messa a punto nel progetto Risk-UE si basa su un censimento degli elementi soggetti a rischio e la loro analisi in termini di valore e vulnerabilità, in modo da individuare gli elementi che possano mettere in crisi il funzionamento dell'intero sistema urbano. Sono previsti due livelli di analisi per la valutazione della vulnerabilità sismica. Il primo livello, di tipo 'macrosismico' si riferisce essenzialmente alla scala macrosismica europea EMS 98. La valutazione viene effettuata con un indice di

vulnerabilità con il quale, noto l'input sismico, è possibile avere una rappresentazione del danno. Definendo la classe tipologica dell'edificio, è possibile definire l'indice di vulnerabilità legato alla tipologia. L'indice finale di vulnerabilità sarà la somma dell'indice tipologico e di un fattore modificatore di comportamento che tiene conto dell'interazione della costruzione all'interno dell'aggregato, delle caratteristiche costruttive locali, dello stato di manutenzione dell'edificio, etc.

Il secondo livello della metodologia è di maggiore dettaglio poiché è necessario avere informazioni migliori per quanto riguarda la geometria, i parametri dinamici e strutturali dell'edificio che consentono lo sviluppo di metodi di capacità e fragilità nell'elaborazione degli scenari di rischio per la stima dei danni e delle perdite legate all'evento.

La metodologia GNDT

A seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980 sono state introdotte ed utilizzate schede per il rilievo del danno del costruito ordinario, sviluppate successivamente dal Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti (GNDT) del C.N.R. conosciute come 'Schede G.N.D.T.' basate sulla procedura proposta da Benedetti e Petrini (1984).

Le schede sono classificate in base alla finalità da raggiungere (GNDT, 1993):

- Scheda di 1°/2° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici (muratura o cemento armato);
- Scheda di 1°/2° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità di edifici particolari (capannoni industriali, chiese, ...);
- Scheda di 1°/2° livello per il rilevamento del danno, pronto intervento ed agibilità nell'emergenza post-sisma (per edifici ordinari);
- Scheda di 1°/2° livello per il rilevamento del danno, pronto intervento ed agibilità nell'emergenza post-sisma (per edifici a struttura prefabbricata o di grande luce).

La prima parte di tutte le schede di rilievo presenta una sezione generale introduttiva per l'identificazione dell'edificio, dai dati geografici (regione, provincia, comune) ai dati di localizzazione (indirizzo, dati catastali). Questa sezione permette la creazione di un database per la catalogazione delle schede.

La scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici è considerata una scheda utile al rilievo e l'ispezione degli edifici dopo gli eventi sismici. La compilazione prevede la definizione dell'estensione e del livello del danno, nonché l'attribuzione di una tipologia edilizia all'edificio rilevato. Attraverso

la compilazione della scheda per ogni edificio è possibile ottenere delle statistiche relative all'esposizione del patrimonio costruito. Per tale motivo all'interno della scheda si trovano sezioni relative alla geometria e dimensione dell'edificio, all'uso e allo stato di manutenzione della struttura e degli impianti.

La scheda di 2° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici invece raccoglie fattori di vulnerabilità relativi ad informazioni tipologiche e costruttive e ad aspetti di regolarità strutturale registrati nel rilievo di ogni singolo edificio sulla base di giudizi di esperti. Ad ogni voce è attribuito un peso nel computo totale e differenti punteggi a seconda delle caratteristiche tipologiche, determinati attraverso analisi statistiche dei dati raccolti in occasione dei terremoti. Attraverso una somma pesata di pesi e punteggi si ottiene un indice di vulnerabilità che definisce la propensione dell'edificio al danneggiamento. Inoltre ad ogni valore dell'indice è associata una curva che correla il fattore di danno al picco di accelerazione dell'input sismico atteso; curve derivate dall'analisi statistica dei rilievi effettuati sugli edifici danneggiati dai terremoti passati in Italia (Guagenti e Petrini, 1989).

La scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza sismica (Figura 3-14), conosciuta come scheda AeDES (Baggio et al., 2000), viene compilata per ogni edificio nella fase di emergenza che segue un evento sismico. La sua finalità è l'individuazione delle caratteristiche tipologiche, del danno e dell'agibilità degli edifici ordinari (con funzioni residenziali o servizi). Costituiscono una procedura di rilievo speditiva che permette un censimento del patrimonio edilizio. Inoltre permette una valutazione dell'agibilità degli edifici a seguito del terremoto in maniera oggettiva. In seguito agli ultimi eventi sismici che hanno coinvolto l'Italia centrale (L'Aquila 2009, Emilia Romagna 2012) sono state apportate delle modifiche nelle schede AeDES con i D.P.C.M. 26 del 05/05/2011 e del 08/07/2014.

A seguito del D.P.C.M. del 14/01/2015 è stata introdotta una ulteriore scheda di valutazione di danno e agibilità dopo un terremoto per edifici a struttura prefabbricata o di grande luce (GL-AeDES). La scheda viene utilizzata per i capannoni industriali, centri commerciali, parcheggi, mercati coperti, purchè la struttura sia prefabbricata o di grande luce (dimensione minima di una campata di 10 metri).

The image shows a complex form titled 'SCHEDA DI LIVELLO DI RILEVAMENTO DANNO, PRONTO INTERVENTO E AGIBILITÀ PER ESPERTI ORDINARI NELL'EMERGENZA POST-SISMICA'. It is divided into several sections:

- SEZIONE 1: Identificazione edificio** - Includes fields for municipality, address, and building identification.
- SEZIONE 2: Descrizione edificio** - A table for recording building characteristics like floor area, height, and use.
- SEZIONE 3: Tipologia** - A table for structural typology and masonry characteristics.
- SEZIONE 4: Danni ad ELEMENTI STRUTTURALI e provvedimenti di pronto intervento (P.I.) eseguiti** - A table for recording structural damage and interventions.
- SEZIONE 5: Danni ad ELEMENTI NON STRUTTURALI e provvedimenti di pronto intervento eseguiti** - A table for recording non-structural damage and interventions.
- SEZIONE 6: Pericolo ESTERNO indotto da altre costruzioni e provvedimenti di p.i. eseguiti** - A table for recording external risks and interventions.
- SEZIONE 7: Terreno e fondazioni** - A table for recording ground and foundation conditions.
- SEZIONE 8: Giudizio di agibilità** - A flowchart and table for assessing the building's habitability.

Figura 3-14 Scheda AeDES

GNDT (Formisano)

Il metodo proposto da Formisano costituisce una nuova metodologia semplificata di valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi. Lo studio propone l'integrazione della scheda di vulnerabilità GNDT per edifici isolati con cinque nuovi parametri rappresentativi della condizione di aggregato. I pesi e i punteggi attribuiti a tali parametri sono stati determinati attraverso l'implementazione di un modello agli elementi finiti (3MURI) di un'unità strutturale tipica del tessuto urbano. Su ciascuna unità analizzata è stata applicata la proposta procedura speditiva di analisi, i cui risultati sono stati comparati con quelli ottenuti dalla messa a punto di un modello FEM dell'intero aggregato. Sono stati aggiunti cinque parametri di valutazione rappresentativi della condizione di aggregato, che possono incrementare o ridurre la vulnerabilità di un'unità strutturale inserita all'interno di un blocco di edifici. Tali fattori sono:

- l'interazione in altezza con gli edifici adiacenti;
- la posizione planimetrica dell'edificio nell'aggregato;
- la presenza e il numero di solai sfalsati tra l'edificio oggetto di indagine e quelli adiacenti;
- la presenza di eterogeneità tipologiche o strutturali fra edifici adiacenti;
- la differenza fra le percentuali di aperture in facciata tra edifici adiacenti.

Ai detti parametri aggiuntivi sono stati attribuiti opportuni pesi e punteggi. Essi sono stati calibrati con 3MURI usando un modello di edificio isolato. Su di esso sono state effettuate analisi pushover in direzione X e Y come da normativa. Per ogni parametro è stato calcolato un indice I_m rapporto tra lo spostamento orizzontale massimo e lo spostamento ultimo dell'edificio.

La scheda è considerata affidabile in termini qualitativi, perché restituisce la stessa scala di vulnerabilità fornita dal modello meccanico. Da una comparazione in termini quantitativi, invece, si nota che, per indici compresi fra 50 e 150, il valore medio di IVNR è inferiore rispetto a quello trovato con la procedura meccanica. D'altro canto, per indici <50 e >150 il metodo sottostima e sovrastima, rispettivamente i risultati della procedura meccanica. Pertanto da tali considerazioni risulta che la procedura speditiva fornisce mediamente risultati a vantaggio di sicurezza solo per unità caratterizzate da elevata vulnerabilità (Formisano et al., 2013).

Elemento	Punteggi (<i>p</i>)				Pesi (<i>w</i>)
	A	B	C	D	
1. Organizzazione delle strutture verticali	0	5	20	45	1
2. Natura delle strutture verticali	0	5	25	45	0.25
3. Posizione dell'edificio e tipo di fondazioni	0	5	25	45	0.75
4. Distribuzione degli elementi resistenti in pianta	0	5	25	45	1.5
5. Regolarità delle piante	0	5	25	45	0.5
6. Regolarità in elevazione	0	5	25	45	1
7. Orizzontamenti	0	5	25	45	0.75
8. Copertura	0	15	25	45	0.75
9. Particolari	0	0	25	45	0.25
10. Stato di fatto	0	5	25	45	1
11. Interazione altimetrica	-20	0	15	45	1
12. Interazione planimetrica	-45	-25	-15	0	1.5
13. Presenza di solai sfalsati	0	15	25	45	0.5
14. Discontinuità tipologiche e strutturali	-15	-10	0	45	1.2
15. Differenza percentuale fra bucatore in facciata	-20	0	25	45	1

Figura 3-15 Scheda GNDT (Formisano)

Il metodo SAVE

Lo studio effettuato nel corso del progetto SAVE (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani) (Zuccaro, 2004) è iniziato nel 2004 con docenti di diverse facoltà di ingegneria di università italiane e da esperti di analisi del rischio sismico, in collaborazione con il Gruppo Nazionale Difesa dei Terremoti.

Gli obiettivi principali del progetto SAVE sono la creazione di un inventario informatizzato delle diverse tipologie costruttive, la stesura di mappe di vulnerabilità ponendo l'accento sull'individuazione di metodologie di miglioramento degli strumenti di analisi della vulnerabilità e del danno. Tale sistema consente l'analisi di edifici esistenti in calcestruzzo armato e muratura, caratterizzati da una progettazione non moderna e non rispondente alle normative antisismiche moderne. Sia per gli edifici in calcestruzzo armato che per quelli in muratura sono stati utilizzati approcci simili ma con due procedure leggermente differenti per ovviare alle diverse modalità di collasso e alle differenti caratteristiche dei due tipi di strutture.

Lo studio del patrimonio edilizio residenziale, condotto da Zuccaro (2004, 2011) sviluppa una nuova metodologia di valutazione della vulnerabilità, che prende in esame ulteriori parametri relativi alle caratteristiche delle tipologie costruttive rispetto alla classificazione EMS 98. Attraverso l'interpretazione statistica dei dati di danneggiamento raccolti in occasione di eventi sismici del passato è stata valutata l'influenza di altri parametri sulla risposta strutturale all'azione sismica per ogni tipologia verticale.

Tali parametri sono:

- Tipologico-strutturali: tipologia di struttura orizzontale, tipologia di copertura, presenza di catene orizzontali, strutture miste;
- Geometriche e di sito: numero di piani, massima altezza, regolarità in elevazione e in pianta, posizione dell'edificio;
- Altre: età di costruzione, danno preesistente, anno di classificazione sismica del comune.
- La metodologia per gli edifici in c.a. sfrutta le peculiarità tipiche di questa tipologia.

La metodologia, denominata VC (Vulnerabilità degli edifici in Calcestruzzo armato), è stata implementata in ambiente Windows Excel, utilizzando procedure in Visual Basic, ed è stata estesamente utilizzata nella valutazione di edifici scolastici di molte zone d'Italia, soprattutto della Basilicata e del Molise, supportandola con rilievi e caratterizzazioni sperimentali dei materiali.

La vulnerabilità valutata mediante il metodo SAVE è riferita a due livelli di danneggiamento corrispondenti alla condizione limite di operatività e di collasso incipiente; il rischio, invece, viene espresso in termini di periodo di ritorno che produce le due condizioni.

Il metodo RE.SIS.TO

La procedura speditiva RE.SIS.TO è stata messa a punto presso l'Università degli Studi di Bologna, con lo scopo di fornire uno strumento in grado di valutare lo stato di criticità di edifici appartenenti ai patrimoni immobiliari consentendo quindi la definizione di priorità d'intervento (Mazzotti et al., 2013).

La metodologia proposta conduce alla definizione di un'accelerazione al suolo di collasso dell'edificio attraverso la valutazione del taglio resistente dello stesso. Il passaggio dallo schema teorico di calcolo alle condizioni reali dell'edificio, considerando quindi possibili criticità strutturali individuate nel corso di sopralluoghi,

avviene facendo uso di un coefficiente riduttivo, ottenuto a partire dai parametri contenuti nelle schede di vulnerabilità GNDT.

Per la valutazione della vulnerabilità sismica con il metodo proposto è necessaria la ricerca d'informazioni tecniche, al fine di ottenere un quadro verosimile dello stato di fatto del fabbricato (geometria, materiali, carichi, criticità). La valutazione della vulnerabilità sismica del sistema è intesa come stima dell'accelerazione sismica che porta al collasso l'edificio e viene confrontata con quella di calcolo per la zona ove è eretta la costruzione e assegnazione della classe di vulnerabilità.

Essendo le strutture in muratura e calcestruzzo armato caratterizzate da meccanismi di collasso differenti, si usano due diversi modelli per la definizione della capacità resistente. È possibile confrontare il taglio resistente a tutti i piani con il taglio sollecitante, ottenuto applicando alla struttura una distribuzione di forze statiche equivalenti ottenuta considerando un'accelerazione spettrale unitaria (Dolce et al., 2004). I diversi rapporti permettono di individuare il piano più debole (quello con il valore minimo di tale rapporto) e di definire la resistenza dell'edificio in termini di accelerazione spettrale ($S_{a,c}$). La capacità convenzionale viene adeguata ad un valore realistico facendo uso di dieci degli undici parametri contenuti nella scheda di vulnerabilità sismica GNDT di II livello. I parametri sono utilizzati per ottenere un coefficiente riduttivo della resistenza del fabbricato. Ad ognuno dei dieci parametri sono associate quattro classi di vulnerabilità, e pertanto quattro punteggi ed il peso relativo tra i vari parametri. Definite le classi di vulnerabilità, al generico i -esimo parametro corrisponderà un punteggio p ed un peso w .

Al fine di migliorare la percezione dei risultati dell'analisi, è stata introdotta una classificazione semplificata denominata appunto RE.SIS.TO (acronimo di Resistenza Sismica Totale): agli edifici viene inizialmente assegnata una delle classi, da I (bassa vulnerabilità) a V (alta vulnerabilità), in funzione del rapporto tra capacità e domanda, in termini di accelerazione al suolo (Figura 3-16).

PGA_c / PGA_d	Classe di resistenza
0% - 25%	V
25% - 50%	IV
50% - 75%	III
75% - 100%	II
> 100%	I



Figura 3-16 Classificazione RE.SIS.TO

Il metodo FaMIVE

L'approccio si basa sull'analisi delle vulnerabilità strutturali attraverso l'identificazione dei meccanismi di collasso attivabili e il calcolo dei fattori di attivazione associati ad essi. I meccanismi sono classificati in base alla probabilità che si verifichino a seconda delle condizioni al contorno delle singole pareti e della qualità dei materiali; i risultati sono ulteriormente manipolati per produrre una misura di vulnerabilità. Il software risultante (FaMIVE = Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation), interfacciato con una banca dati, è stato sviluppato nel tempo per includere una ampia gamma di possibili meccanismi di collasso per ottenere un'accurata modellizzazione e valutazione del meccanismo.

I dati raccolti tramite un modulo elettronico sono archiviati in un database e direttamente disponibili per la valutazione della vulnerabilità sismica di una facciata o della costruzione mediante l'applicazione dell'analisi limite.

I dati di rilievo si ottengono attraverso l'ispezione in loco e si concentra su quei parametri che possono qualificare direttamente le prestazioni sismiche degli edifici in muratura e possono essere per lo più rilevati dalla strada.

Sulla base delle informazioni raccolte, può essere identificato un gruppo di meccanismi fattibili, per ognuno dei quali viene calcolato il fattore di carico finale. Ciò è espresso dall'indice ESC, capacità di taglio equivalente, in termini di percentuale di accelerazione di gravità (D' Ayala & Speranza, 2002).

The image displays the FaMIVE software interface, which is a comprehensive inspection form for historic buildings. It is divided into several main sections:

- 1 URBAN DATA:** Includes fields for building name, address, and type of survey.
- 2 GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE FACADES:** Contains data on facade orientation, position, and height.
- 3 GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF OPENINGS:** Provides a detailed grid for recording window and door openings, including their dimensions and positions.
- 4 PLAN GEOMETRIC CHARACTERISTICS:** Focuses on the thickness and length of structural walls.
- 5 STRUCTURAL CHARACTERISTICS:** Assesses the masonry type, mortar, and the level of maintenance.
- 6 FURTHER VULNERABILITY ELEMENTS:** Evaluates specific features like floor additions, vertical additions, roof overhangs, and chimneys.
- 7 DAMAGE LEVEL AND MECHANISMS IDENTIFICATION:** Includes a table for identifying damage classes and a sketch of the facade with a color-coded damage map.

The interface uses a grid-based layout for data entry and includes various calculation fields and summary statistics. A small photograph of a building facade is visible in the bottom right corner of the interface.

Figura 3-17 Metodo FaMIVE

Analisi cinematiche

Per valutare quantitativamente la vulnerabilità sismica delle costruzioni esistenti sono state, nel corso degli anni, introdotte procedure di *analisi per la valutazione della vulnerabilità sismica*.

Numerosi autori hanno proposto da tempo di ricorrere all'analisi limite dell'equilibrio (Giuffré 1993), (Gurrieri, et al. 1999). Per l'analisi sismica, in forma approssimata, dei possibili meccanismi di collasso locali individuati per l'edificio esistente in muratura, si può fare quindi ricorso ai metodi dell'analisi limite dell'equilibrio. Tali analisi permettono di determinare un coefficiente α che rappresenta il moltiplicatore dei carichi agenti in corrispondenza della condizione di equilibrio limite per il meccanismo considerato. Per l'applicazione dell'analisi cinematica lineare, si adotta il modello del corpo rigido non resistente a trazione (Heyman 1966), e si considerano agenti i pesi propri, i carichi verticali portati e le forze di massa orizzontali prodotte dal sisma (Figura 3-18). Inoltre, si ipotizza assenza di scorrimento fra i blocchi e resistenza a compressione della muratura infinita.

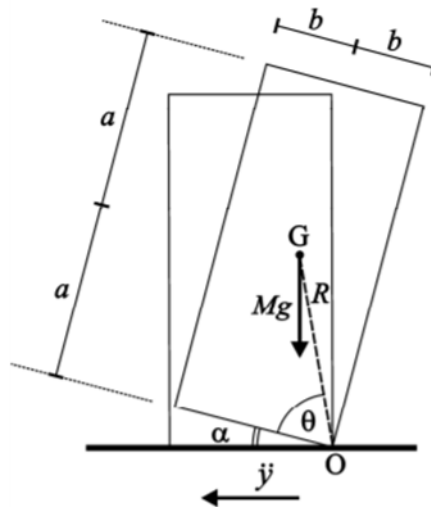


Figura 3-18 Modello di blocco rigido non resistenze a trazione

Per lo svolgimento dell'analisi occorre conoscere la geometria della struttura, la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica. Inoltre occorre tener conto della resistenza a compressione e della tessitura della muratura, della presenza e dell'efficacia della connessione tra le pareti e tra le pareti e gli orizzontamenti, della presenza di catene e di tiranti, delle interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti. La necessità di effettuare le verifiche nei confronti dei meccanismi fuori piano per la valutazione della vulnerabilità sismica di

un edificio in muratura, è stata palesemente disposta per la prima volta dall'OPCM 3274 dell'8 Maggio 2003. Tali prescrizioni sono state riprese quasi integralmente dalla successiva OPCM 3431 del 3 Maggio 2005, dalle NTC 2008 e dalle vigenti NTC 2018. L'impianto normativo individua per l'analisi dei meccanismi locali due tipologie di analisi basate sull'approccio cinematico: l'analisi cinematica lineare, volta a determinare la capacità in termini di resistenza, e l'analisi cinematica non lineare, finalizzata a valutare la capacità in termini di spostamento. Si illustrano di seguito sinteticamente le procedure di analisi e verifica per i meccanismi locali, secondo le indicazioni contenute nella Circolare NTC 2018. Circolare n. 7 del 21 Gennaio 2019, "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al DM 17 gennaio 2018”. C.S.LL.PP, 2019.

Analisi cinematica lineare

Generalmente, definita la porzione di muratura soggetta al cinematismo, il moltiplicatore di collasso α_0 è calcolato applicando il Principio dei Lavori Virtuali in termini di spostamento (Circolare NTC 2018, 2019), a meno che per il meccanismo di flessione orizzontale confinata. In questo caso, dato che il meccanismo si attiva per schiacciamento della muratura nella sezione di mezzeria della parete, il moltiplicatore di attivazione α_0 si ottiene dall'equazione di equilibrio limite della sezione di mezzeria (Beolchini, et al. 2007). Successivamente si calcola l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0 , per poi procedere alla verifica semplificata allo SLV con fattore di struttura (Circolare NTC 2018, 2019). Supposto che la porzione di costruzione interessata dal meccanismo si comporti come infinitamente rigida fino alla sua attivazione, il cinematismo si attiva quando l'accelerazione massima alla quota z , a cui si colloca il meccanismo locale in esame, è uguale all'accelerazione a_0 . Anche se non ben esplicitato dalla Circolare, la verifica di sicurezza può essere svolta confrontando l'accelerazione di riferimento al suolo a_g , valutata per la probabilità di superamento dello SLV nella vita di riferimento (§3.2 delle NTC 2018) con l'accelerazione al suolo $a_{g,SLV}$, determinata moltiplicando per un fattore di comportamento q l'accelerazione relativa allo SLD ($a_{g,SLD}$). Quest'ultima è ricavata uguagliando l'accelerazione spettrale di attivazione a_0 con l'accelerazione massima alla quota z , data dalla relazione:

$$a_z(z) = \sqrt{\sum (a_{z,k}(z))^2}$$

in cui

$$a_{z,k}(z) = S_e(T_k, \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2}$$

dove:

- $S_e(T_k, \xi_k)$ è lo spettro di risposta elastico al suolo, valutato per il periodo equivalente T e lo smorzamento viscoso equivalente ξ dell'elemento del meccanismo locale considerato;
- γ_k è il coefficiente di partecipazione modale della costruzione, che può essere calcolato attraverso la formula approssimata $\gamma = 3N/(2N + 1)$, con N numero di piani dell'edificio;
- $\psi_k(z)$ è la forma modale alla quota z , data dall'espressione $\psi(z) = Z/H$, essendo z l'altezza, rispetto alla fondazione dell'edificio, del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati dal meccanismo ed il resto della struttura.

Analisi cinematica non lineare

L'analisi cinematica non lineare permette di valutare la curva di capacità della struttura. Tale curva descrive l'andamento del moltiplicatore dei carichi orizzontali α al crescere dello spostamento d_k di un punto di controllo della costruzione, in genere scelto in prossimità del baricentro delle masse. La curva deve essere ricavata fino all'annullamento della forza sismica orizzontale ($\alpha=0$) in corrispondenza dello spostamento $d_{k,0}$. A tale scopo è necessario prendere in considerazione, oltre alla configurazione iniziale, anche le configurazioni variate della catena cinematica. In corrispondenza di ciascuna configurazione variata, il valore del moltiplicatore α è determinato applicando il Principio dei Lavori Virtuali. La curva, se le azioni vengono mantenute costanti durante l'evoluzione del cinematismo, sarà lineare e descritta dalla relazione:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 - d_k/d_{k,0})$$

La curva ottenuta è trasformata nella curva di capacità di un sistema equivalente ad un grado di libertà, riportante sull'asse delle ordinate l'accelerazione a^* e sull'asse delle ascisse lo spostamento d^* , descritta dall'espressione:

$$a^* = a_0^* \cdot (1 - d^*/d_0^*)$$

dove d_0^* è lo spostamento spettrale equivalente corrispondente allo spostamento $d_{k,0}$.

Lo spostamento spettrale d^* dell'oscillatore equivalente può essere ottenuto come spostamento medio dei diversi punti nei quali sono applicati i pesi P_i , pesato sugli stessi. In via approssimata, noto lo spostamento del punto di controllo d_k è possibile definire lo spostamento spettrale equivalente con riferimento agli spostamenti virtuali valutati sulla configurazione iniziale:

$$d^* = d_k \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}}$$

dove n , m , P_i , $\delta_{x,i}$ sono definiti come sopra e $\delta_{x,k}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto k , assunto come riferimento per la determinazione dello spostamento d_k .

Nota la curva di capacità dell'oscillatore equivalente, sarà possibile definire la capacità di spostamento ultimo d_u^* del meccanismo locale allo Stato limite di Salvaguardia della Vita, come lo spostamento corrispondente al minore fra gli spostamenti così definiti: a) il 40% dello spostamento per cui si annulla l'accelerazione spettrale a^* valutata su una curva in cui si considerino solamente le azioni di cui è verificata la presenza fino al collasso; b) lo spostamento corrispondente a situazioni localmente incompatibili con la stabilità degli elementi della costruzione nei casi in cui questo sia valutabile. Per la verifica allo SLV mediante spettro di capacità, infatti, occorre poi confrontare la capacità di spostamento ultimo del meccanismo locale con la domanda di spostamento richiesta dall'azione sismica. Per la valutazione di quest'ultima occorre distinguere fra il caso in cui la verifica riguarda elementi appoggiati a terra e il caso in cui, invece, il meccanismo indagato sia relativo a porzioni di edificio poste ad una certa quota da terra.

3.4 Bibliografia

- “NTC.” (2018) Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" D. M. 17 gennaio 2018.
- “OPCM n. 3274.” Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. G.U. 8 maggio 2003, n. 105 - S.O. n. 72, 20 Marzo 2003.
- “OPCM n. 3431.” Ulteriori modifiche ed integrazioni all'O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica». G.U. 10 maggio 2005, n. 107 - S.O. n. 85, 3 Maggio 2005.

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., 2000. Manuale per la compilazione della scheda di 1 livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES). Servizio sismico Nazionale e Gruppo Nazionale per la difesa dai Terremoti 112.
- Bartolucci, D. (2009). Principi di laser scanning 3D. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni* 18, 66-74.
- Beolchini, Giovanni C., et al. Sisma del 1997 nella Regione Marche: repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Rapporto di ricerca, Regione Marche, CNR-ITC, Università degli Studi dell'Aquila, Osimo (AN): Tipografia s.r.l. Grafiche Scarponi, 2007.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Parodi, S. (2007). Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98.
- Bianchini, M. (2008). Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia. Aracne.
- Bini, M., & Bertocci, S. (2012). Manuale di rilievo architettonico e urbano. Novara, Italia: Città Studi Edizioni.
- Bolognesi, M. (2016). La fotogrammetria digitale e la computer vision per l'ingegneria civile: teoria e casi studio.
- Braga, F., Dolce, M., & Liberatore, D. (1982, September). A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. In *Proceedings of the seventh European conference on earthquake engineering*, Athens, Greece (pp. 431-450).
- Brusaporci, S. (2010). Sperimentazione di modelli tridimensionali nello studio dell'architettura storica.
- Circolare NTC 2018. Circolare n. 7 del 21 Gennaio 2019, "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al DM 17 gennaio 2018". C.S.LL.PP, 2019.
- D'ayala, D., & Speranza, E. (2002). An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings. *disp*, 3(1), 3-3.
- D'Ayala, D., & Speranza, E. (2004, January). Un criterio per la formulazione e la calibrazione di curve di fragilità e scenari di danno: il caso di Nocera Umbra

- (PG). In 9th National Conference “L’Ingegneria Sismica in Italia”, Relazioni su invito e memorie in CD-ROM, Memoria B3-D2.
- Docci, M., & Maestri, D. (1984). Il rilevamento architettonico: storia, metodi e disegno. Laterza.
- Dolce, M., 1991. Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche. *L’Industria delle costruzioni* 25, 44-57.
- Dolce, M., Masi, A., Samela, C., Santarsiero, G., Vona, M., Zuccaro, G., Cacace, F., Papa, F., 2004. Esame delle caratteristiche tipologiche e del danneggiamento del patrimonio edilizio di San Giuliano di Puglia, in: XI Congresso Nazionale ‘L’ingegneria Sismica in Italia’, pp. 25-29.
- Fava, M., Munari, M., da Porto, F., & Modena, C. (2015). Valutazione della vulnerabilità sismica locale di edifici esistenti in muratura attraverso analisi cinematica dei meccanismi di collasso e curve di fragilità. XVI Convegno ANIDIS “L’Ingegneria Sismica in Italia”, L’Aquila, Italy.
- Formisano, A. (2017). Local-and global-scale seismic analyses of historical masonry compounds in San Pio delle Camere (L’Aquila, Italy). *Natural Hazards*, 86(2), 465-487.
- Formisano, A. (2017). Theoretical and numerical seismic analysis of masonry building aggregates: case studies in San Pio Delle Camere (L’Aquila, Italy). *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), 227-245.
- Formisano, A., Marzo, A., & Indirli, M. (2013). Analisi comparativa tra metodi di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici murari di Arsita (TE). Proc. XV Convegno ANIDIS (Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica).
- Giuffré, A. Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia. Bari: Laterza, 1993.
- GNDT, 1993. Rischio sismico di edifici pubblici, Parte I: aspetti metodologici, in: Proceedings of CNR Gruppo Nazionale Difesa Terremoti, Roma, Italia.
- Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998. European Seismological Commission (ESC).
- Guagenti, E., Petrini, V., 1989. Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità, in: Proceedings of the 4th Italian National Conference on Earthquake Engineering, pp. 145-153.
- Gurrieri, Francesco, et al. Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post sismica degli edifici - Regione Umbria. Edited by Francesco Gurrieri. Roma: Edizioni DEI tipografia del Genio Civile, 1999.

- Heyman, J. (1966). The stone skeleton. *International Journal of solids and structures*, 2(2), 249-279.
- Lagomarsino, S., Cattari, S., 2015. Perpetuate guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, 13-47.
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S., 2013. TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures* 56, 1787-1799.
- Lenza, P., Ghersi, A., & Calderoni, B. (2011). *Edifici in muratura*. Dario Flaccovio.
- Mazzotti, C., Savoia, M., Chinni, C., Perri, G., 2013. Una metodologia speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici in muratura e calcestruzzo armato. *Progettazione Sismica* 2.
- Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. (2008). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni (2008)(accessed: 21 February 2012).
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., 2004. The european RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios, in: *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Paris, L. (2012). *Fotogrammetria e/o fotomodellazione*.
- Paris, L., & Paris, L. (2010). Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura.
- Pera, F., Pesce, P., Bevilacqua, M., Setti, P., & Menini, M. (2016). Analysis of different impression techniques and materials on multiple implants through 3-dimensional laser scanner. *Implant dentistry*, 25(2), 232-237.
- Polese, M., 2002. Un approccio a doppio livello per la valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in ca. Ph.D. thesis.
- Remondino, Fabio, and Sabry El-Hakim. "Image-based 3D modelling: a review." *The photogrammetric record* 21, no. 115 (2006): 269-291.
- Remondino, Fabio. "Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse." *DISEGNRECON* 4, no. 8 (2011): 90-98.
- Valluzzi, M. R., Munari, M., Modena, C., Cardani, G., & Binda, L. (2007, June). *Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio*

di Norcia. In 12 Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia (pp. 10-14).

Zuccaro, G., 2004. SAVE - Strumenti aggiornati per la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio e dei sistemi urbani. Tema 1: Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio-economiche. Napoli.

Zuccaro, G., 2011. Strategie di riduzione del rischio a medio termine su scala regionale. Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIST) Università di Napoli Federico II, workshop di coordinamento nuovo progetto ReLUIS.

CAPITOLO 4.

UN “ALGORITMO” PER L’ANALISI MULTILIVELLO BIM

La valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura

4.1 Introduzione

Come emerge dallo studio della letteratura, la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti può essere effettuata secondo metodologie basate su modelli per l’analisi strutturale caratterizzati da differenti livelli di accuratezza e in grado di fornire differenti informazioni. Tali modelli possono riferirsi all’insieme di più costruzioni concatenate, quali l’aggregato strutturale, al singolo edificio o a sue singole parti o componenti. La definizione di tali modelli e il livello di affidabilità degli stessi sono strettamente connessi al grado di conoscenza della costruzione che consente di individuare le caratteristiche degli elementi che ne determinano il comportamento strutturale. Tale grado di conoscenza può essere raggiunto tramite differenti tecniche/strumenti di indagine (es. indagini storico-critiche, rilievo architettonico, rilievo strutturale e tecnologico, caratteristiche dei materiali, indagini diagnostiche, etc..).

Sulla base di tali considerazioni e dell’obiettivo di questo lavoro di ricerca, presentato nel capitolo precedente, si vuole, in questa fase, introdurre la nuova metodologia progettata e pensata per la definizione di un nuovo strumento di analisi di ausilio agli Enti preposti per la mitigazione del rischio sismico, ai tecnici e ai privati. La nuova metodologia è stata testata su un caso di studio reale, il Borgo San Rocco a Sora in provincia di Frosinone, di cui si parlerà nel capitolo successivo.

La procedura proposta è innovativa, poiché combina aspetti legati alla conoscenza della costruzione con differenti metodologie di analisi in modo razionale ed efficiente, organizzandoli e collegandoli a diversi livelli e stabilendo relazioni tra questi. Appare evidente come l’approccio utilizzato per l’analisi di vulnerabilità sismica della

costruzione/aggregato sia strettamente correlato alle informazioni disponibili, riguardanti le proprietà geometriche e meccaniche, così come la storia e l’evoluzione dell’oggetto (ampiamente evidenziato anche dalla NTC 2018). A tale scopo vengono definiti diversi livelli di indagine e analisi strutturale per la valutazione del comportamento della costruzione e della risposta meccanica degli elementi strutturali e dei materiali.

Si definisce un *livello 1* di valutazione della sicurezza sismica basato su un grado di conoscenza minimo, ovvero su un numero limitato di informazioni, dove la definizione della sicurezza sismica è meramente di tipo qualitativo (Figura 4-1)

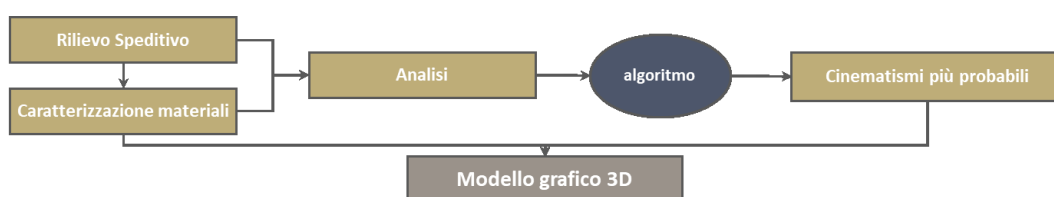


Figura 4-1 Schema semplificato del livello 1

I dati necessari per questa procedura si ottengono da un **rilievo a vista, di tipo diretto-speditivo**, che definisce la geometria prevalente e la caratteristica materica dell’apparecchio murario. L’insieme dei dati diventano il supporto di un algoritmo utilizzato per ottenere, in modo qualitativo, il più probabile cinematismo di collasso che si attiva per un edificio sollecitato dall’azione sismica. I dati costituiscono anche la base geometrica per la costruzione di un modello grafico di tipo 3D “statico” inteso come un modello non-informativo ma visualizzatore delle caratteristiche geometrico/tecnologiche dell’edificio.

Il livello successivo, denominato *livello 2* si basa invece, su approcci di modellazione più raffinati, i quali richiedono un grado di conoscenza dell’edificio più approfondito e dettagliato. Per questo motivo il rilievo è di tipo strumentale-di dettaglio e la valutazione della sicurezza, in tal caso, diventa di tipo quantitativo, con l’adozione di modelli computazionali che riproducono con procedure numeriche il comportamento della costruzione (Figura 4-2).

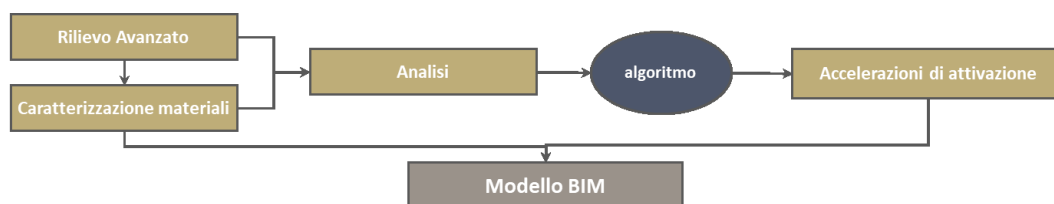


Figura 4-2 Schema semplificato del livello 2

Il modello grafico utilizzato per questo livello è di tipo informativo BIM, dinamico perché collegato all’algoritmo restituisce graficamente, sulla base di una scala cromatica appositamente scelta, non soltanto gli edifici che potrebbero essere soggetti al più probabile cinematismo di collasso ma anche l’accelerazione di attivazione del meccanismo di collasso e gli esiti delle verifiche secondo le vigenti normative antisismiche, le NTC 2018. La procedura è stata definita dagli autori “Algoritmo Saccucci-Grande”. È evidente, dunque, come la scelta del tipo di indagine e di analisi strutturale sia strettamente correlata all’obiettivo che si vuole raggiungere e all’impegno economico da sostenere.

4.2 Metodologia e fasi

I differenti livelli di analisi, definiti **Livello 1** e **Livello 2**, precedentemente introdotti seguono una metodologia rigorosa, come riportato Figura 4-3.

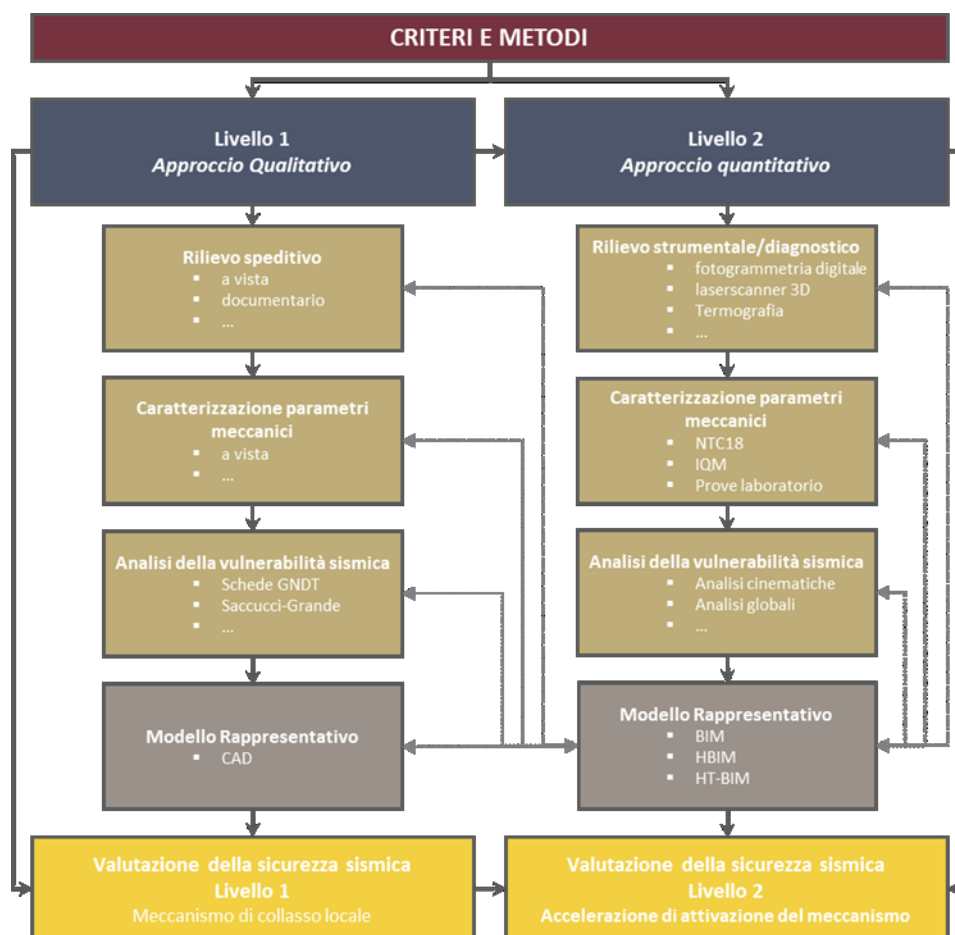


Figura 4-3 Flowchart della metodologia

Lo schema evidenzia la forte correlazione tra i livelli previsti per l’analisi di vulnerabilità sismica di edifici in aggregato o isolati e le relative tecniche di rilievo tradizionale e avanzato. In dettaglio, i due livelli (1 e 2), distinti in base al grado di conoscenza del costruito e alla tipologia dell’analisi per la valutazione del comportamento sismico degli edifici.

4.2.1 Approccio di Livello 1: analisi qualitativa

Consiste in un approccio semplificato per la valutazione qualitativa della vulnerabilità sismica sulla base di informazioni deducibili tramite attività di rilievo

speditivo sia in termini geometrici che in termini di individuazione del tipo di muratura e, lì dove possibile, di dettagli costruttivi.

In particolare, le fasi di analisi di tale approccio possono essere sintetizzate come segue (Figura 4-4):



Figura 4-4 Sintesi schematica dell’approccio qualitativo

Il **rilievo** per questo livello deve essere in grado di definire l’evoluzione storica dell’edificio necessaria per comprendere le caratteristiche generali dell’edificio, di eventuali stratificazioni tipologiche/strutturali e presenza di superfetazioni sulla base di osservazioni a vista e sulla procedura del rilievo diretto. Le informazioni desumibili in questo approccio riguardano:

- l’analisi documentaria, con l’acquisizione di materiale di archivio (privato, di Stato, Regionali, Comunali, Ater etc.) per individuare le fasi evolutive e gli interventi trasformativi dell’edificio nel corso degli anni ed eseguire un’analisi storico-critica della costruzione;
- la morfologia del terreno sul quale l’edificio è ubicato, se è di natura pianeggiante o in pendio e se è sotto o sopra versante etc.. A questo scopo le cartografie tecniche di base (CTR e Catastali) e i sistemi di visualizzazione delle immagini satellitari (Google Earth, Bing Maps etc.) sono di grande ausilio;
- la tipologia architettonica, se si tratta di un edificio in linea, a ballatoio etc.; la tipologia strutturale, con la quale si individua la struttura portante verticale prevalente (sistema a scheletro indipendente in c.a., muratura, misto etc.) e in particolare gli orizzontamenti (voltati, lignei, latero-cementizi etc.);
- le dimensioni dell’edificio, in relazione allo sviluppo in pianta (per i diversi piani) e volumetrico, al numero di piani fuori terra e interrati o seminterrati, all’altezza degli interpiani e all’altezza dell’imposta della copertura;

- le caratteristiche significative dell’edificio, tese ad individuare alcune singolarità come un numero di piani variabili (perché l’edificio è in pendio), la presenza di una doppia altezza in un unico volume, un volume unico privo di solai intermedi, la presenza di pilotis e i tetti a falde o terrazzati. Questa analisi richiede anche l’individuazione di disallineamenti delle bucatore (porte/finestre) in facciata oppure la presenza di cordoli e/o catene e di sopraelevazioni;
- le caratteristiche materiche dell’edificio, individuano, soprattutto in facciata, la presenza di intonaco, cortine di mattoni o muratura a vista. In questo ultimo caso è possibile acquisire informazioni aggiuntive sulle caratteristiche dell’apparecchio murario;
- lo stato di conservazione dell’edificio si desume dal rilievo a vista delle superfici. In applicazione alle Raccomandazioni NorMal 1/88 “Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico (CNR_ICR, 1990, Roma)” possono essere individuate le principali patologie di degrado, naturali e antropiche, definite le principali cause dei fenomeni descritti, e rappresentate per individuarne la consistenza. Allo stesso modo, secondo una simbologia convenzionalmente riconosciuta in Italia, si individua il quadro fessurativo, in pianta e in alzato, rappresentando le tipologie, diffuse, ad angolo, fuori piombo, disconnessione, espulsione materiale etc.

In questa fase è indispensabile valutare la qualità del sistema resistente che dipende dal materiale utilizzato, dal tipo di apparecchiatura muraria, dal tipo di connessioni presenti all’interno dello spessore murario, oltre che dal livello di degrado. Questa analisi può definirsi di **caratterizzazione dei parametri meccanici e dei dettagli** a vista. Sono previsti saggi ed ispezioni che consentano di esaminare, almeno localmente, le caratteristiche della muratura sotto intonaco e nello spessore, caratterizzando così la sezione muraria, il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali e le zone di appoggio dei solai, i dispositivi di collegamento e di eliminazione delle spinte. La procedura descritta alla base del rilievo è comunque in accordo con quanto richiesto dalle indagini limitate previste dalla Circolare delle NTC 2018 e dall’OPCM 4007/2012 per l’analisi della Condizione Limite dell’Emergenza introdotta per verificare l’efficacia dei Piani di Emergenza adottati dai Comuni.

La metodologia prevede una elaborazione di tutti i dati di rilievo ed analisi utilizzati nelle fasi precedenti a mezzo della realizzazione di un **modello tridimensionale CAD** semplificato. Esso è meramente qualitativo ed è funzionale alla verifica della

congruenza delle informazioni raccolte; rappresenta inoltre uno strumento per la visualizzazione diretta dei risultati delle analisi utile alla comprensione delle vulnerabilità individuate da parte dei tecnici e dei non-tecnici.

Tale modello può essere realizzato partendo dalle informazioni documentarie di base ed arricchito, anche in maniera dinamica nel tempo, dalle informazioni desunte dal rilievo diretto sul campo.

A questo punto della procedura, è possibile eseguire l’**analisi della vulnerabilità sismica con approcci semplificati di Livello 1**. Grazie ad algoritmo, sviluppato in linguaggio booleano (vero/falso), che confronta il dataset delle informazioni acquisite con le peculiarità strutturali che caratterizzano i cinematismi di collasso degli edifici in muratura, si individua il meccanismo di crollo con maggiori probabilità di accadimento per ogni singolo edificio. La struttura dell’algoritmo è l’insieme delle carenze tipologiche, strutturali e costruttive, responsabili dell’attivazione di un probabile meccanismo (dedotte dalla letteratura) unitamente alle informazioni geometriche e dimensionali di base, a cui il rilievo deve mirare (Tabella 1-1).

Tabella 4-1 Parametri per il funzionamento dell’algoritmo

	A	B	C	D	E	F	G
Snellezza Bassa	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
Ammorsamento degli interpiani	NO	SI	NO	NO	NO	SI	-
Cordolo di sommità	NO	NO	-	NO	SI	NO	NO
Ammorsamento delle pareti ortogonali alla facciata	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO
Catene e tiranti	NO	NO	NO	NO	NO	SI	-
Allineamento delle bucatore	-	-	-	SI	-	-	-
Discontinuità delle sezioni murarie	-	-	-	-	SI	-	-
Luce elevata tra le pareti perpendicolari alla facciata	-	-	-	-	-	SI	-
Presenza del timpano in facciata	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI

Il vantaggio di tale metodologia di analisi consiste nella possibilità di ottenere la descrizione dettagliata del comportamento della struttura in caso di evento sismico nei confronti dei meccanismi locali senza la necessità di ricorrere alle numerose analisi che prevedono la valutazione qualitativa e numerica di ogni tipologia di meccanismo di collasso che può coinvolgere l’edificio, dispendiosa in termini di tempo e risorse.

Affinché l’analisi sia efficiente è evidente che il rilievo debba concentrarsi su quei parametri che possono qualificare le prestazioni sismiche degli edifici in muratura e che possono essere rilevati in gran parte da osservazioni sommarie desunte da rilievi a vista. Durante l’indagine l’operatore è tenuto a riconoscere all’interno del centro urbano la tipologia di schemi ricorrenti nel tessuto urbano, il tipo di muratura e la qualità dei materiali. Questo set di dati di solito si riferisce direttamente alle tecniche di costruzione locali e la disponibilità di materiali che accomuna edifici per analogie di schemi architettonici, strutturali e tipologie di materiali presenti in un determinato centro urbano. Una seconda serie di dati si riferisce a ciascun edificio: l’altezza e la lunghezza della facciata visivamente ispezionabile, il numero di piani, la disposizione delle aperture, i dispositivi di consolidamento ecc.. Con l’insieme di questi dati è possibile identificare lo scenario di collasso della facciata; la loro analisi, unita alle informazioni di carattere strutturale ricavabili dalla consultazione di mappe o documenti sugli edifici, permette l’individuazione delle criticità. Infatti è possibile individuare la presenza o meno di ammorzamento dei solai, di cordoli in sommità, ammorzamento tra le pareti ortogonali alla facciata, catene e tiranti, geometria regolare delle bucaure, discontinuità evidenti delle sezioni murarie, presenza del timpano in facciata ecc. Dal confronto delle peculiarità strutturali rilevate e le carenze strutturali che caratterizzano l’attivazione un particolare cinematismo di crollo è possibile definire quale possa essere il più probabile in caso di evento sismico.

In sintesi, l’algoritmo realizzato per l’individuazione del più probabile cinematismo di collasso degli edifici in muratura proposto da Saccucci M., Pelliccio A. e Grande E. (Pelliccio et al., 2017), sviluppato in ambiente Excel®, si basa su una “scheda di rilievo” ed è articolato in tre fasi principali (Figura 4-5,6):

- 1) Inserimento e lettura dei dati di input;
- 2) Elaborazione dei dati;
- 3) Visualizzazione dei dati di output.

SCHEDA DI VALUTAZIONE DEL MECCANISMO DI COLLASSO PER EDIFICI IN MURATURA	
0. INFORMAZIONI GENERALI	
1 Regione	
2 Provincia	
3 Città	
4 Indirizzo	
5 Aggregato Strutturale	
6 Unità strutturale	
7 Destinazione d'uso	
8 Data di rilievo	
9 Rilevatore	
1. DATI SUL TESSUTO URBANO	
1 N° di US nell'AS	
2 Posizione dell'US rispetto all'AS	
3 Connessione con pareti adiacenti	
2. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA FACCIATA	
1 Orientamento della facciata	
2 Numero di piani dell'edificio	
3 Numero di piani della facciata	
4 Lunghezza facciata [m]	
5 Altezza totale facciata [m]	
6 Presenza in parete del timpano	
7 Altezza timpano (se presente)	
8 Snellezza	
3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLE BUCATURE	
1 Numero di bucaure per piano	
<i>piano 1</i>	<i>piano 6</i>
<i>piano 2</i>	<i>piano 7</i>
<i>piano 3</i>	<i>piano 8</i>
<i>piano 4</i>	<i>piano 9</i>
<i>piano 5</i>	<i>piano 10</i>
2 Stima dimensioni aperture [m]	
<i>base</i>	
<i>altezza</i>	
3 Altezza fascia orizzontale superiore [m]	
4 Bucature allineate verticalmente	
4. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PIANTA	
1 Spessore muro inferiore della facciata [m]	
2 Spessore muro superiore (%)	
3 N° pareti portanti interne perp. alla facciata	
4 Luce tra le pareti perp. alla facciata	
5 Discontinuità sezioni murarie	
6 Ammorsamento pareti perpendicolari alla facciata	

Figura 4-5 Algoritmo di calcolo (1)

5. CARATTERISTICHE STRUTTURALI	
1 N° impalcati con strutture a volta	
2 Tipologia solaio	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
3 Orditura solaio rispetto alla facciata	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
4 Tipologia tetto	
5 Orditura del tetto	
6 Tipo di muratura	
7 Catene	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
8 Ammorsamento impalcato	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
9 Cordolo in sommità	
6. MECCANISMO DI COLLASSO	
1 Possibile meccanismo di collasso	
7. INTERFERENZA	
1 Lunghezza ingombro al suolo [m]	

Figura 4-6 Algoritmo di calcolo (2)

Inserimento e lettura dei dati di input

I dati di input sono separati in 5 sezioni distinte:

0. Informazioni generali;
1. Dati sul tessuto urbano;
2. Caratteristiche geometriche della facciata;
3. Caratteristiche geometriche delle bucaure;
4. Caratteristiche geometriche della pianta;
5. Caratteristiche strutturali.

0. Informazioni generali

0. INFORMAZIONI GENERALI	
1	Regione
2	Provincia
3	Città
4	Indirizzo
5	Aggregato Strutturale
6	Unità strutturale
7	Destinazione d'uso
8	Data di rilievo
9	Rilevatore

Figura 4-7 Algoritmo: informazioni generali

La sezione riguardante le informazioni generali è composta da 9 campi in cui vanno inserite Regione, Provincia, Città, Indirizzo, Aggregato Strutturale, Unità Strutturale e Destinazione dell’edificio analizzato. Quest’ultimo campo può essere compilato a mezzo di un menu a tendina in cui sono elencate le destinazioni d’uso indicate nelle tabelle delle Categorie Catastali.

Destinazione d'uso	
	Negozi
Abitazione	Opificio
Albergo	Ospedale
Biblioteca	Prigione
Cimitero	Rimessa
Cinema	Scuola
Faro	Stazione
Istituto di credito	Teatro
Laboratorio	Tettoia
Luogo di culto	Ufficio privato
Magazzino	Ufficio pubblico
Musco	Altro

Figura 4-8 Algoritmo: destinazione d’uso

Il campo 8 e il campo 9 indicano rispettivamente la Data di rilievo e le informazioni riguardanti le generalità del Rilevatore.

1. Dati sul tessuto urbano

1. DATI SUL TESSUTO URBANO	
1 N° di US nell'AS	
2 Posizione dell'US rispetto all'AS	
3 Connessione con pareti adiacenti	

Figura 4-9 Algoritmo: dati sul tessuto urbano

La sezione riguardante i dati sul tessuto urbano è composta da 3 campi in cui va indicato:

- il numero di unità strutturali che compongono l’aggregato strutturale (1 nel caso di edificio isolato);
- la posizione dell’unità strutturale rispetto all’aggregato strutturale che può essere interna, d’estremità o d’angolo e selezionabile tramite un menu a tendina;
- l’eventualità di connessioni della facciata dell’edificio analizzata con le pareti delle unità strutturali adiacenti.

2. Caratteristiche geometriche della facciata

2. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA FACCIATA	
1 Orientamento della facciata	
2 Numero di piani dell'edificio	
3 Numero di piani della facciata	
4 Lunghezza facciata [m]	
5 Altezza totale facciata [m]	
6 Presenza in parete del timpano	
7 Altezza timpano (se presente)	
8 Snellezza	

Figura 4-10 Algoritmo: caratteristiche geometriche della facciata

La sezione riguardante le caratteristiche geometriche della facciata è composta da 8 campi. Nel primo campo va indicato l’orientamento della facciata e può essere compilato con un menu a tendina in cui sono indicate le seguenti direzioni: Nord, Nord – Ovest, Ovest, Sud – Ovest, Sud, Sud – Est, Est, Nord – Est.

Nel secondo campo si indica il numero di piani massimo di cui si compone l’edificio analizzato.

Nel terzo campo si indica invece il numero di piani di cui si compone la facciata dell’edificio analizzata.

Il campo 4 e 5 indicano rispettivamente la lunghezza e l’altezza della facciata desumibili dal rilievo a vista previsto nell’approccio qualitativo di primo livello.

Il campo 6 e 7 indicano la presenza o meno del timpano in facciata e se presente l’eventuale altezza.

Nell’ottavo campo si indica la snellezza della facciata calcolabile tramite il rapporto tra l’altezza della facciata e lo spessore del muro.

3. Caratteristiche geometriche delle bucatore

3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLE BUCATURE			
1 Numero di bucatore per piano			
<i>piano 1</i>		<i>piano 6</i>	
<i>piano 2</i>		<i>piano 7</i>	
<i>piano 3</i>		<i>piano 8</i>	
<i>piano 4</i>		<i>piano 9</i>	
<i>piano 5</i>		<i>piano 10</i>	
2 Stima dimensioni aperture [m]			
<i>base</i>			
<i>altezza</i>			
3 Altezza fascia orizzontale superiore [m]			
4 Bucature allineate verticalmente			

Figura 4-11 Algoritmo: caratteristiche geometriche delle bucatore

La sezione riguardante le caratteristiche geometriche della facciata è composta da 4 campi.

Nel primo campo vanno inseriti i numeri di bucatore (porte, finestre, porte – finestre, altro) rilevate per ogni piano della facciata.

Nel secondo campo vanno inserite le dimensioni stimate delle aperture, sia la base che l’altezza.

Nel terzo campo invece va definita l’altezza della fascia orizzontale superiore.

Nel quarto campo si indica se il sistema di bucatore sia disallineato o presenta degli allineamenti verticali.

4. *Caratteristiche geometriche della pianta*

4. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PIANTA	
1	Spessore muro inferiore della facciata [m]
2	Spessore muro superiore (%)
3	N° pareti portanti interne perp. alla facciata
4	Luce tra le pareti perp. alla facciata
5	Discontinuità sezioni murarie
6	Ammorsamento pareti perpendicolari alla facciata

Figura 4-12 Algoritmo: caratteristiche geometriche della pianta

La sezione riguardante le caratteristiche geometriche della pianta è composta da 6 campi.

Il primo campo è relativo allo spessore del muro della facciata alla base.

Nel secondo campo è espressa la dimensione del muro superiore normalizzata rispetto alle dimensioni del muro inferiore.

Nel terzo campo invece va indicato il numero di pareti portanti interne ortogonali alla direzione della facciata.

Il quarto campo indica la distanza massima tra le pareti perpendicolari alla facciata.

Nel caso in cui è presente una diminuzione della sezione muraria andando dal basso verso l’alto va indicata nel quinto campo.

L’ultimo campo di tale sezione indica la possibilità di avere l’ammorsamento delle pareti perpendicolari alla facciata alla facciata stessa a seconda della tipologia muraria rilevata e dalle caratteristiche costruttive osservate.

5. *Caratteristiche strutturali*

5. CARATTERISTICHE STRUTTURALI	
1 N° impalcati con strutture a volta	
2 Tipologia solaio	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
3 Orditura solaio rispetto alla facciata	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
4 Tipologia tetto	
5 Orditura del tetto	
6 Tipo di muratura	
7 Catene	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
8 Ammorsamento impalcato	
<i>impalcato 1</i>	<i>impalcato 6</i>
<i>impalcato 2</i>	<i>impalcato 7</i>
<i>impalcato 3</i>	<i>impalcato 8</i>
<i>impalcato 4</i>	<i>impalcato 9</i>
<i>impalcato 5</i>	<i>impalcato 10</i>
9 Cordolo in sommità	

Figura 4-13 Algoritmo: caratteristiche strutturali

La sezione riguardante le caratteristiche strutturali è composta da 9 campi.

Nel primo campo va indicato il numero di impalcati dell’edificio che presentano strutture voltate.

Nel secondo e terzo campo va indicata rispettivamente, per ogni impalcato, la tipologia edilizia (cemento armato, legno, laterocemento, putrelle e tavelloni, volta o altro) e l’orditura rispetto alla facciata dell’impalcato (parallela o perpendicolare).

Nel quarto e quinto campo va indicata la tipologia di tetto (assente, falda unica, doppia falda o padiglione) e l’orditura rispetto alla facciata dell’edificio.

Il sesto campo va compilato indicando la tipologia di muratura con cui è stata realizzata la facciata a mezzo di un menu a tendina in cui sono elencate le varie tipologie:

Tabella 4-2 Tipologia di muratura

Tipologia di muratura	
Blocchi di cls o argilla espansa	Conci sbazzati
Blocchi di cls semipieni	Mattoni pieni
Blocchi lapidei squadriati	Mattoni semipieni
Blocchi laterizi semipieni	Pietrame disordinata
Conci in pietra tenera	Pietre a spacco

Nel settimo e ottavo campo vanno indicate rispettivamente la presenza di catene o sistemi di tiranti per ogni impalcato e l’eventualità dell’ammorsamento dell’impalcato rispetto alla facciata dell’edificio.

L’ultimo campo indica la presenza di un cordolo in sommità per la copertura.

Elaborazione dei dati: individuazione delle criticità

L’algoritmo, in base ai dati inseriti nelle varie sezioni della scheda di valutazione del meccanismo di collasso per edifici in muratura, elabora le caratteristiche strutturali riscontrate. In funzione di queste ultime il foglio di calcolo individua o meno la presenza di:

- 1) snellezza bassa
- 2) ammorsamento degli interpiani
- 3) cordolo in sommità
- 4) ammorsamento delle pareti perpendicolari alla facciata
- 5) catene e tiranti
- 6) bucatore allineate
- 7) discontinuità delle sezioni murarie
- 8) luce elevata tra le pareti perpendicolari alla facciata
- 9) presenza del timpano in facciata

L’algoritmo associa il valore di vero o un falso alla presenza o meno delle caratteristiche strutturali appena elencate. Poiché l’attivazione di ogni tipologia di cinematiso di collasso è determinata dalla assenza di una o più di queste peculiarità strutturali (Figura 4-14), l’algoritmo, in funzione dei dati riportati e dalla loro combinazione, è in grado di elaborare un confronto con le condizioni critiche che attivano il cedimento strutturale.

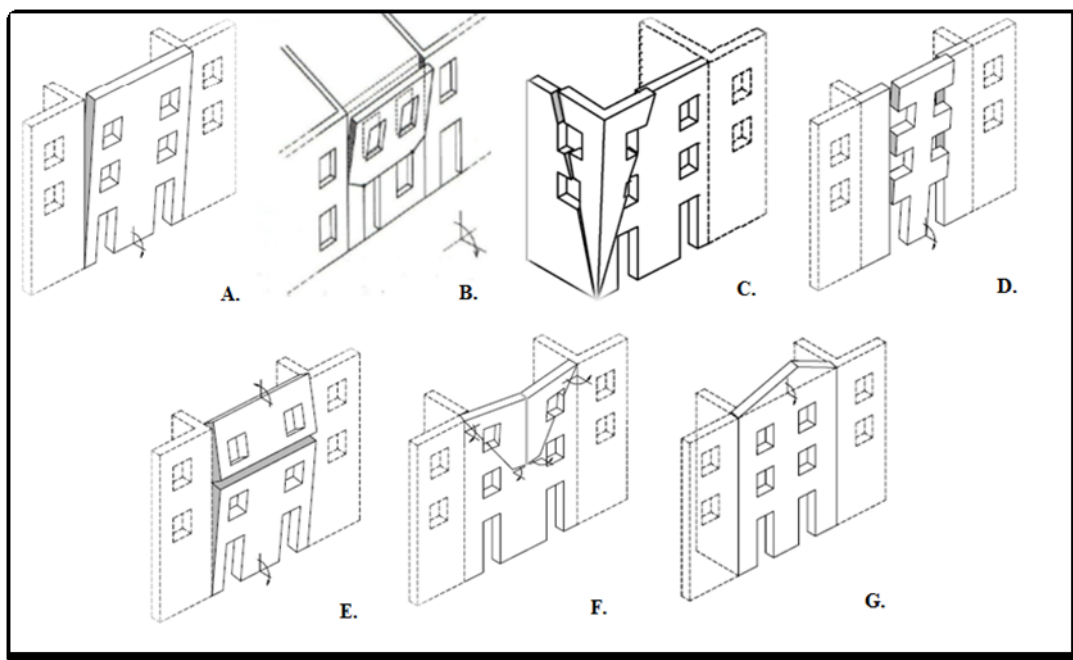


Figura 4-14 Meccanismi di collasso fuori piano: A| ribaltamento semplice globale; B| ribaltamento semplice parziale; C| ribaltamento del cantonale; D| ribaltamento lungo le aperture; E| ribaltamento di flessione verticale; F| ribaltamento di flessione orizzontale; G| ribaltamento del timpano

Visualizzazione dei dati di output

6. MECCANISMO DI COLLASSO	
1	Possibile meccanismo di collasso
7. INTERFERENZA	
1	Lunghezza ingombro al suolo [m]

Figura 4-15 Algoritmo: meccanismo di collasso

Dal confronto tra le carenze strutturali rilevate per l’edificio oggetto di analisi e quelle che caratterizzano un determinato cinematismo di collasso, l’algoritmo è in grado di identificare quello che presenta la probabilità più alta di attivarsi in quanto verificate le condizioni critiche. I risultati ottenuti dalle analisi previste per il Livello 1 attraverso un approccio di tipo qualitativo possono essere rappresentati in maniera

grafica associando il meccanismo di collasso identificato mediante l’algoritmo al modello grafico 3D realizzato a valle del rilievo speditivo. Infatti attraverso questo tipo di visualizzazione è possibile avere una stima qualitativa della vulnerabilità a cui sono soggetti gli edifici in muratura esistenti in caso di evento sismico in riferimento ai meccanismi di collasso fuori piano (Figura 4-16).

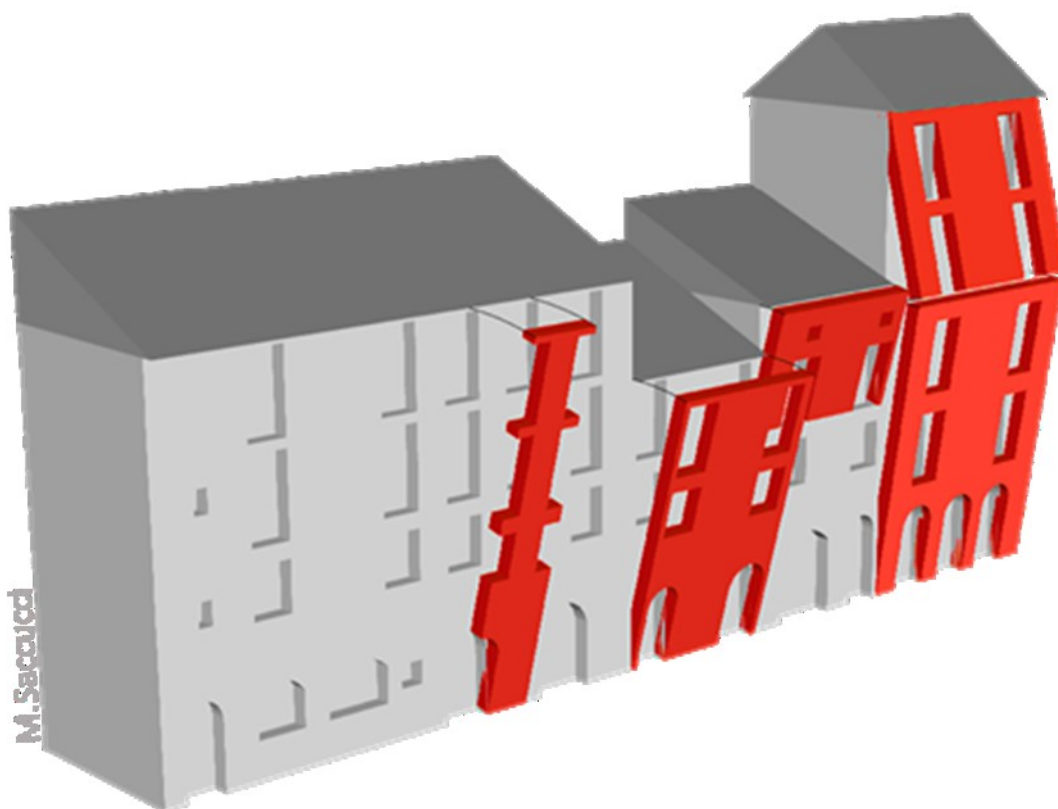


Figura 4-16 Visualizzazione dei cinematismi

4.2.2 Approccio di Livello 2: analisi quantitativa

Consiste in un approccio avanzato per la valutazione quantitativa della vulnerabilità sismica sulla base di informazioni deducibili tramite attività di rilievo strumentale –di dettaglio basato su un modello informativo di tipo Building Information Modelling (BIM). Si tratta di una valutazione quantitativa perché associa ai possibili meccanismi di collasso anche informazioni sul livello di accelerazione sismica di attivazione del meccanismo e può essere condotta sia su edifici isolati che su edifici in aggregato (Figura 4-17).

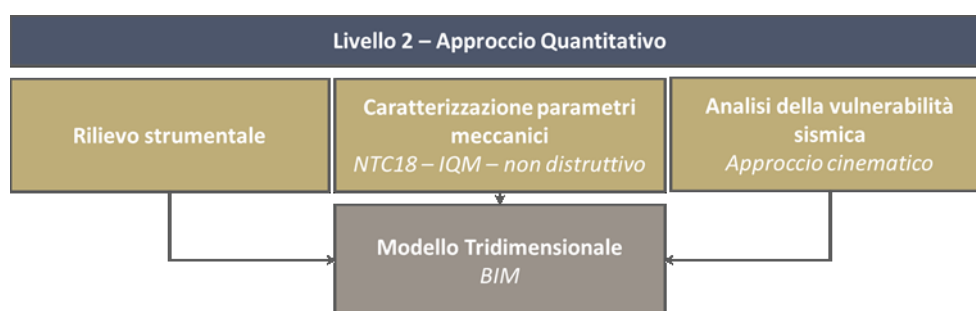


Figura 4-17 Sintesi schematica dell'approccio quantitativo

Il **Livello 2** è una metodologia che richiede una conoscenza “as built” dell’edificio analizzato. Per questo motivo i rilievi devono essere accurati e dettagliati per fornire ulteriori informazioni come ad esempio i dettagli costruttivi (cordoli di piano, collegamenti tra le pareti, orditura dei solai, dimensioni delle aperture etc.) oppure lo stato di conservazione del manufatto architettonico. Per raggiungere questo obiettivo è necessario eseguire un **rilievo strumentale-di dettaglio** in grado di fornire non soltanto un modello geometrico affidabile ma anche le numerose informazioni che l’analisi richiede. Dalla letteratura appare evidente che sono diverse le tecniche da utilizzare a questo livello. Di seguito si riportano quelle che sembrano più idonee:

La *fotogrammetria digitale aerea con drone e terrestre*, definita tecnica a sensori passivi, consente di creare dei modelli reality-based a partire da immagini fotografiche digitali ad alta risoluzione e applicando dei particolari algoritmi di correlazione delle immagini (Remondino e El-Hakim, 2006). Nel Livello 1 il quadro fessurativo è definito nella localizzazione e geometria del dissesto. In questo livello avanzato, con la tecnica fotogrammetrica è possibile analizzare eventuali stati di deformazione con la lettura di piani fuori piombo, rispetto alla geometria iniziale. La possibilità, inoltre, di integrare le immagini acquisite con altri sensori permette di dettagliare con estrema precisione la geometria e le caratteristiche materiche dell’edificio (Simon et al., 2010) (El Hakim et al., 2004; Guidi et al., 2009). Per la realizzazione del rilievo

fotogrammetrico terrestre è necessaria una buona fotocamera e l’accortezza di eseguire in rilievo possibilmente nelle stesse ore del giorno poiché la differenza di luce potrebbe generare la non riconoscibilità dei pixel dell’immagine fotografica impedendo di fatto l’allineamento dei fotogrammi. Con lo stesso principio il rilievo fotogrammetrico da drone va progettato secondo strisciate con un overlap superiore al 50% sia in direzione orizzontale che verticale, ad una quota fissa superiore all’elemento più alto dell’area in esame.

Le *tecniche geomatiche*, sono numerose ed utili ad interpretare il cinematismo all’origine di una lesione. Le stazioni totali in modalità RL (reflectorless), rilevano un numero di punti sufficiente a discretizzare con buona approssimazione la forma dell’oggetto e ad individuare eventuali anomalie; gli interferometri radar (Gens e Van Genderen, 1996) sono sempre più utilizzati per il rilievo e lo studio delle deformazioni di grandi strutture (Tsakiri et al., 2006; Pesci et al., 2011; Chen et al, 2012; Guarnieri et al., 2013).

Il *rilievo laser scanner* è una tecnica in grado di acquisire milioni di punti simultaneamente e in modo non invasivo, garantendo una mappatura geometrica anche di grandi superfici con parametri di risoluzione, accuratezza ed incertezza di misura molto elevati (Guidi et al., 2010). La nuvola di punti, risultato del rilievo, restituisce il valore della riflettanza in RGB, ovvero ogni punto della nuvola, in funzione delle condizioni ambientali, conserva un valore dell’RGB rappresentativo del materiale, del degrado, di fratture etc. Il modello tridimensionale ottenuto consente di analizzare deformazioni geometriche dovute ad esempio alla cattiva esecuzione dell’opera oppure a sovraccarichi verticali, etc.

Il Livello 2 richiede una **caratterizzazione dei parametri meccanici della muratura di dettaglio**, che si possono ottenere per analogia alle tipologie murarie presenti nella tabella C8.5.I della circolare n. 7 del 2019. Si può, quindi, fare uso dei valori medi di riferimento dei parametri meccanici forniti da tale tabella, eventualmente amplificati con i coefficienti della tabella C8.5.II. In alternativa, per l’identificazione delle caratteristiche meccaniche delle murature, si può ricorrere alla metodologia denominata Indice di Qualità Muraria (IQM) (Borri, 2015), attraverso la quale è possibile risalire a una stima quantitativa dei parametri meccanici sulla base dell’osservazione della muratura, volta alla constatazione del rispetto totale o parziale o l’assoluto non rispetto della cosiddetta “regola d’arte”. Nello specifico si ricava, al variare della direzione dell’azione sollecitante, il valore dell’IQM. Tale indice, poi, viene correlato ai valori forniti dalle NTC dei seguenti parametri di resistenza e deformabilità delle murature:

- f_m = resistenza media a compressione;
- τ_0 = resistenza media a taglio;
- E = valore medio del modulo di elasticità normale.

Inoltre, si può anche procedere in analogia con murature simili, ossia quelle murature che presentano le stesse caratteristiche qualitative risalenti a epoche di costruzioni comparabili e soggette agli stessi fenomeni di degrado sulle quali sono state effettuate delle prove diagnostiche. A questo livello, potrebbe essere utile ricorrere a indagini non distruttive di tipo indiretto (ad esempio prove soniche e sclerometriche), le quali, seppur non forniscano valutazioni dirette dei parametri meccanici, consentono di individuare la presenza di particolari costruttivi e di valutare l’omogeneità delle caratteristiche meccaniche nelle diverse parti della costruzione. È buona norma verificare tali aspetti per almeno un pannello murario rappresentativo di ogni tipologia muraria. L’attendibilità del risultato sarà tenuta in considerazione per mezzo del Fattore di Confidenza (FC), che influirà sulla capacità strutturale dell’edificio o dell’elemento preso in esame.

La tipologia di analisi richiede una modellazione grafica più complessa e in grado di contenere al proprio interno la quantità di informazioni raccolte nella fase di rilievo. A questo scopo la **modellazione BIM** sembra essere la più ideata. Acronimo di *Building Information Modeling*, è una metodologia per la progettazione, pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite il supporto digitale di software. Nel processo i dati relativi al manufatto, e ad ogni sua caratteristica, vengono definiti oltre che con informazioni geometriche e spaziali, soprattutto con informazioni non visive, quindi di carattere informativo. Sta proprio in questa possibilità di avere informazioni non visive la potenza nascosta dietro l’utilizzo di questo tipo di progettazione, poiché oltre ad ottenere un modello 3D, il più possibile corrispondente alla realtà in termine grafico, è possibile aggiungere tanti tipi di informazioni (Eastman et al., 2011).

L’adozione di una metodologia che permetta di creare un unico contenitore al quale i diversi attori possono aggiungere ed estrarre le informazioni desiderate potrebbe essere definita come indispensabile se si vuole avere, anche nel campo delle costruzioni, i miglioramenti che si sono avuti nei campi dell’industria negli ultimi decenni. La metodologia BIM offre numerosi spunti sul quale lavorare per portare dei miglioramenti sostanziali nel processo edilizio. È ampiamente dimostrato infatti come sia il prodotto che i processi per ottenerli siano più efficienti in termini di utilizzo di risorse, impiego del lavoro, impiego di energia nella costruzione e nell’esercizio, spesa

di costruzione e gestione. La metodologia di progettazione BIM non si ferma alla sola fase architettonica e strutturale, ma si estende alla fase impiantistica, energetica e gestionale, coprendo l’intero ciclo di vita dell’opera. I vantaggi che sono frutto dell’utilizzo di questa tecnologia possono essere (Volk et al., 2014):

- maggiore efficienza del processo edilizio grazie alla definizione contestuale alla progettazione di quantità e materiali necessari alla realizzazione;
- diminuzione degli errori dovuti alle incongruenze architettoniche/strutturali ed impiantistiche, risolte nelle fasi di coordinamento virtualizzate;
- riduzione dei costi grazie all’ausilio di una pianificazione digitalizzata molto dettagliata;
- facilità di condivisione dei dati tra i diversi attori della filiera; gestioni varianti di progetto in modo integrale e sinergico tra le varie discipline.

I vantaggi derivanti dalla digitalizzazione del processo edilizio sono ormai verificati testati soprattutto in ambito internazionale, ma la sua implementazione ha riscontrato diversi ostacoli. Essendo infatti un processo condiviso interdisciplinare ha bisogno di un cambio di paradigma per essere attuato, banalmente è molto complesso fare questo tipo di cambio in modo isolato o unilaterale, senza tener conto delle problematiche che si verificheranno durante l’interazione con gli altri attori. Per questo motivo infatti sotto la spinta di associazioni di settore i principali governi hanno deciso di intraprendere delle roadmap ben specifiche per l’ottenimento di livelli di maturità digitale sempre maggiore (Sacks et al., 2010).

Il Livello 0 la base iniziale, ovvero dove la digitalizzazione è minima, ci si riferisce dunque a tavole CAD di disegni 2D con annotazioni informative stampate in formato cartaceo per lo scambio di informazioni.

Il Livello 1 consiste in un modello 3D dove vengano introdotte funzioni di coordinamento spaziale, ma dove il passaggio di informazioni avviene tramite elaborati specifici 2D.

Il Livello 2 implementa maggiormente la collaborazione, che in questo caso deve avvenire in maniera digitale introducendo i modelli BIM; va programmata una procedura per la condivisione delle informazioni, così come la scelta dei veicoli informativi, con l’obiettivo di formare un modello che possa essere da coordinamento interdisciplinare tra i vari modelli progettati separatamente ma tutti in sinergia tra loro, si pone un ulteriore accento sull’importanza dei dati collegati alle entità presenti nei modelli.

Il Livello 3 rappresenta un processo integrato BIM con dati openBIM che possono essere condivisi durante l’intero ciclo di vita dell’opera grazie anche a sensoristica e servizi web. In questo caso si necessita quindi di servizi web collaborativi ed integrati con processi completamente aperti, conformi alle normative di interoperabilità emergenti IFC ed IFD.

L’introduzione dei BIM ha reso necessario normare il suo utilizzo. L’ambiente italiano, a livello legislativo e normativo, è scarso e deficitario, anche se negli ultimi anni i progressi sono stati molto più rapidi. Se paragonato alle altre realtà europee ed internazionali, l’Italia è nettamente indietro, basti tenere a mente che la prima normativa UNI relativa al BIM è stata pubblicata nel 2009, revisionata nel 2017 ed alcune sue parti sono ancora in fase di pubblicazione, mentre negli altri paesi si sono già avuti diversi aggiornamenti. Bisogna però anche evidenziare che negli ultimi anni vi è stato un forte incremento nell’adozione del BIM, l’avvicinamento a questa metodologia da parte di grandi aziende del settore, maggiori studi tecnici e l’avanzamento della ricerca accademica italiana hanno sollecitato dunque la creazione di normative e leggi che vadano a colmare il vuoto legislativo. Negli ultimi anni infatti si sono avvicinati le pubblicazioni di leggi, decreti e normative relative al BIM (Pavan, 2017).

Il Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50 codice dei contratti pubblici, è già stato aggiornato ed ampliato, ed è la prima legge in Italia che si riferisce all’utilizzo del BIM. Il decreto attuativo ministeriale 560 del 01/12/2017, chiamato appunto Decreto BIM, definisce i tempi di adozione del BIM in Italia così come alcune definizioni a corredo. Entrato in vigore solamente il 29/01/2018 stabilisce che l’obbligo dell’utilizzo di metodi e strumenti elettronici di modellazione per opere pubbliche decorre:

- dal 1° gennaio 2019 per le opere di importo da 100 milioni di euro;
- dal 2020 per i lavori complessi oltre i 50 milioni di euro;
- dal 2021 per i lavori complessi oltre i 15 milioni di euro;
- dal 2022 per le opere oltre i 5,2 milioni di euro;
- dal 2023 per le opere oltre 1 milione di euro;
- dal 2025 per tutte le nuove opere.

Tali decorrenze obbligheranno tutta la filiera, dai progettisti agli operatori delle stazioni appaltanti, ad aggiornarsi per adeguarsi alle direttive; è sicuramente un passo avanti poiché questo avanzamento tecnologico permetterà alla collettività di ottenere opere pubbliche più efficienti con un impiego di risorse inferiore. A connubio della

legislazione italiana vi è la normativa UNI 11337:18, pubblicata inizialmente nel 2009 ma in continuo aggiornamento (Pavan, 2017).

Le parti della norma UNI 11337:18 sono:

- Parte 1 - Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi
- Parte 2 - Criteri di denominazione e classificazione di modelli, prodotti e processi
- Parte 3 - Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell’informazione tecnica per i prodotti da costruzione (schede informative digitali per prodotti e processi)
- Parte 4 - Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati ed oggetti
- Parte 5 - Flussi informativi nei processi digitalizzati
- Parte 6 - Linea Guida per la redazione del capitolato informativo
- Parte 7 - Requisiti di conoscenza, abilità e competenza per le figure coinvolte nella gestione digitale dei processi
- Parte 8 - Processi integrati di gestione delle informazioni e delle decisioni
- Parte 9 - Fascicolo del costruito
- Parte 10 - Verifica amministrativa

Nel corso degli anni è stata elaborata una struttura di sviluppo che permette di definire per ogni progetto un Level of Development, o Livello di Sviluppo, che definisca la quantità e il grado di approfondimento e di accuratezza delle informazioni fornite dal modello. Questi standard garantiscono efficienza e chiarezza nella comunicazione finalizzata all’esecuzione del modello BIM, fondamentali per raggiungere l’obiettivo specifico del prodotto finale senza correre il rischio di impegnare troppe o troppo poche risorse (Fai & Rafeiro, 2014).

Nei LOD Specifications forniti dal sito BIM Forum è fatta distinzione tra Level of Detail, o Livello di Dettaglio, e Level of Development, o Livello di Sviluppo. Il primo è sostanzialmente quanti dettagli sono inseriti nell’elemento modellato, e può essere considerato come l’input o l’obiettivo iniziale della progettazione, mentre il Level of Development rappresenta il grado al quale la geometria dell’elemento e le relative informazioni sono state approfondite. Quest’ultimo inoltre fornisce il grado di completezza a cui gli utenti del BIM possono far affidamento e si può quindi dire che sia l’output della modellazione. In letteratura normalmente non si suddivide il significato dell’acronimo inglese LOD, ma si parla quasi sempre di Level of Detail intendendo, erroneamente, sia la richiesta che l’effettiva consegna di informazioni più o meno approfondite. È importante notare che non si può parlare di LOD per quanto

riguarda un modello nella sua globalità, in quanto esso è formato dall’unione di un gran numero di elementi, ognuno caratterizzato da un proprio grado di dettaglio e di sviluppo. Questi livelli, che spaziano in maniera crescente dal 50 al 500, sono descritti con estrema accuratezza nel documento LOD Specifications per ogni elemento tecnico del sistema edilizio, ma macroscopicamente possono essere descritti come segue (Leite, 2011):

- LOD 100: gli elementi del modello possono essere rappresentati graficamente con simboli o altre rappresentazioni generiche, non raggiungendo però il dettaglio del LOD 200. Le informazioni legate agli elementi possono essere ricavate da modelli simili
- LOD 200: gli elementi del modello sono rappresentati graficamente come sistemi, oggetti o componenti generici, arricchiti da quantità, dimensione, geometria, posizione e orientamento approssimativi. Informazioni non grafiche possono essere allegate agli elementi costituenti il modello, che può essere utilizzato per effettuare analisi preliminari sulle prestazioni globali date da diversi sistemi semplificati.
- LOD 300: il modello presenta elementi che sono rappresentati graficamente come sistemi, oggetti o componenti specifici in termini di quantità, dimensione, geometria, posizione e orientamento. Questi possono essere dotati di informazioni non grafiche. Con il termine specifico si intende che le informazioni in questione possono essere misurate direttamente dal modello senza dover far riferimenti ad altri modelli o a note esterne. L’utilizzo di questo LOD permette di eseguire simulazioni prestazionali di specifici sistemi modellati appositamente per il progetto.
- LOD 350: questo livello di dettaglio intermedio aggiunge agli elementi con un LOD 300 la complessità di interfacciarsi con altri sistemi all’interno del modello.
- LOD 400: come per il LOD 300, gli elementi sono rappresentati graficamente all’interno del modello come sistemi, oggetti o componenti specifici in termini di dimensione, geometria, posizione, quantità e orientamento. Vi è inoltre l’aggiunta delle informazioni riguardanti i particolari costruttivi, il processo di produzione, l’assemblaggio e l’installazione. Possono essere allegati dati non grafici quali le schede tecniche dei singoli prodotti e codici di pratica.

- LOD 500: gli elementi del modello sono verificati e controllati in loco e rappresentano correttamente ciò che è stato costruito in termini di dimensioni, geometria, posizione, quantità e orientamento. Anche in questo caso possono essere allegate informazioni non grafiche. Il modello è utilizzato nella fase di gestione dell’opera in quanto è una copia virtuale dell’opera arricchita di tutte le informazioni necessarie per la manutenzione.

Il BIM è pensato per la progettazione di nuovi organismi edilizi e tutti i processi e gli strumenti ad esso legati, soprattutto i software, si basano su questo presupposto di base. Le varie figure professionali che intervengono nella progettazione usufruiscono di uno strumento che dentro di sé condensa differenti aspetti ma che funziona bene solo se basato sulla realizzazione del “nuovo”. Una delle maggiori critiche rivolte al BIM, e ai processi ad esso correlati, riguarda appunto il limite di poter utilizzare questo metodo solo nella nuova progettazione; oggi questo è solamente un luogo comune, infatti è dimostrabile che il BIM è utilizzabile anche nell’edilizia esistente, sia come documentazione storica, per analisi su ciò che già c’è, sia per la manutenzione e la progettazione futura. In questo frangente nasce l’HBIM, come processo BIM applicato agli edifici esistenti, sia che essi siano monumentali sia che siano semplici abitazioni degli anni ’50 del XX secolo, questo approccio aumenta enormemente le potenzialità del metodo, perché ne espande l’utilizzo anche per la creazione di modelli del costruito esistente, e non solo come loro restituzione digitale e geometrica in 3D, ma come modelli intelligenti ricchi di informazioni, in cui tutte le parti che li compongono sono oggetti anch’essi intelligenti, parametrici e con una semantica ben definita.

Il termine HBIM è stato utilizzato la prima volta nel 2009 in un articolo scientifico del professore Maurice Murphy, e dei suoi colleghi, del Dublin Institute of Technology (Murphy et al., 2013). Con questo termine si indica un nuovo modo di modellare gli organismi edilizi esistenti utilizzando un processo BIM, e generando dei modelli intelligenti che possono contenere e gestire informazioni, in tutto e per tutto simili ai modelli BIM per nuove costruzioni. Con l’HBIM si applica una sorta di “reverse engineering” sugli edifici esistenti, perché si vanno a studiare i processi costruttivi che li hanno generati e in sostanza, mentre si modella l’edificio, si studiano i procedimenti che hanno portato alla costruzione di quel particolare organismo edilizio andando a migliorare la modellazione stessa in una sorta di feedback positivo, nel quale modellando l’esistente si acquisiscono informazioni le quali verranno utilizzate per migliorare il successivo procedimento di modellazione in un processo iterativo sempre più accurato. La modellazione, nell’HBIM, parte da un rilievo, e solitamente si tratta di un rilievo digitale, nel quale utilizzando strumenti come laser scanner, o macchina

fotografica per la fotogrammetria terrestre, che generando le nuvole di punti permettono la ricostruzione dell’edificio oggetto di studio. Il modello così definito rappresenta un documento storico tanto della fase di indagine, quanto di quella di modellazione, che può facilmente essere integrato in modelli successivi come fase del processo di gestione dell’opera. Inoltre il database risulta essere utile alla descrizione in termini numerici e percentuali della quantità di elementi indagati, rimanendo comunque aperto a successive modifiche e integrazioni, in modo da costituire un corpus unico di dati informatizzati, reperibili e distinguibili in ogni momento sia per la gestione manutentiva e amministrativa, che per successivi interventi e valutazioni. Solitamente la maggior parte dei modelli HBIM sono progettati per la singola opera edilizia, in particolare per controllare sulla base dei dati di rilievo, il processo di interventi di recupero o restauro (Brusaporci, 2018) (Bevilacqua et al., 2017). In continuità con gli studi nell’ambito della tutela e salvaguardia dei centri storici, nel 2017 è stato introdotto dallo stesso autore che scrive, un nuovo sistema BIM, denominato **HT_BIM**, acronimo di **H**istorical **T**own **B**uilding **I**nformation **M**odeling, pensato come strumento per di supporto alla salvaguardia di un intero ambito urbano costituito da uno o più aggregati di edifici storici. (Pelliccio et al., 2017) Il sistema proposto è basato su informazioni generali e di dettaglio dedotte dal rilievo diretto e strumentale e consente in un unico modello di esaminare differenti aspetti, individuando possibili criticità strutturali e di degrado ambientale. Tra questi, la possibilità di analizzare le vulnerabilità strutturali per azioni sismiche sulla base delle informazioni contenute nel sistema HT_BIM; l’analisi e la visualizzazione dei fenomeni di degrado ambientale dovuti al vento, con l’ausilio di gallerie del vento virtuali (Flow Design); lo studio dell’esposizione solare, con la simulazione del soleggiamento (Solar Analysis). È evidente dunque l’importanza di un sistema informativo contenente informazioni generali e di dettaglio tramite le quali sia possibile tenere conto della complessa realtà degli aggregati di edifici storici. La metodologia proposta prevede per l’approccio di tipo quantitativo la realizzazione di un modello “as built” così come definite dalla norma UNI 11337- 1/2017 introdotta in applicazione ai modelli informativi BIM. Esso richiede un rilievo con un livello di conoscenza molto elevato. Utilizzando le tecniche di rilievo avanzate previste nella metodologia si può costruire un modello estremamente versatile e dinamico che costituisca una sorta di database tridimensionale contenente tutte le informazioni rilevate ed analizzate con l’approccio di primo livello e tutti i dati di rilievo ed analisi previsti dall’approccio di secondo livello. Esso permette l’interrogazione del modello dal punto di vista geometrico, materico e funzionale interattivo, nonché la gestione e

visualizzazione dei risultati di analisi in maniera diretta, in virtù delle caratteristiche intrinseche che definiscono il sistema BIM. Grazie alla possibilità di interazione tra diversi soggetti coinvolti nell’analisi/gestione del costruito e alla possibilità di work-sharing del modello, esso costituisce la piattaforma su cui agire per il monitoraggio e l’analisi del patrimonio costruito.

A questo punto, acquisite le informazioni e modellate in BIM è possibile eseguire l’**analisi della vulnerabilità sismica con approcci avanzati**. In questo livello si prosegue con un’analisi più approfondita dei principali fattori, rilevati nelle fasi precedenti, che influenzano il comportamento della costruzione soggetta ad azione sismica e si effettua una valutazione quantitativa della vulnerabilità sismica attraverso degli approcci semplificati:

In particolare per i meccanismi di collasso fuori piano oggetti della trattazione di procede con le seguenti analisi:

Analisi cinematica lineare

Tale analisi viene svolta con riferimento ai diversi elementi costituenti la costruzione che possono essere suscettibili di collasso per perdita di equilibrio dovuta a fenomeni di ribaltamento o flessione fuori dal piano. In particolare, per ognuno di tali elementi, e con riferimento ai diversi meccanismi di collasso locale, l’analisi fornisce il moltiplicatore orizzontale α_0 dei carichi che porta all’attivazione del meccanismo esaminato, attraverso l’applicazione del Principio dei Lavori Virtuali in termini di spostamento. A supporto delle analisi cinematiche occorre conoscere i parametri geometrici e meccanici, i dettagli costruttivi e le connessioni tra i diversi elementi, che caratterizzano la porzione di costruzione investigata. Tali dati, in parte desumibili dal rilievo visivo e documentario, condotto nell’ambito dell’approccio di livello 1, sono ricavati con maggiore grado di affidabilità attraverso le tecniche di rilievo strumentale e caratterizzazione meccanica dei materiali precedentemente descritte. Nello specifico è necessario avere informazioni sullo stato di conservazione e sulle proprietà meccaniche dei materiali costituenti la muratura (malta e blocchi) e sul grado di tessitura muraria, per determinare le caratteristiche meccaniche (peso specifico e resistenza a compressione) della muratura nel suo complesso. È altresì indispensabile conoscere la geometria delle pareti (spessore, altezza interpiano, dimensioni delle bucatore presenti), il grado di ammorsamento tra le pareti ortogonali e tra le pareti e gli orizzontamenti, la presenza e l’efficacia di catene o altri elementi atti ad assorbire spinte, la tipologia e l’orditura degli orizzontamenti intermedi e di copertura, etc.

Nel Livello 2 la struttura dell’algoritmo usato per le analisi è la stessa del Livello 1 ma si arricchisce di informazione dettagliate sia di carattere geometrico, materico, tecnologico e strutturale.

Visualizzazione dei risultati in BIM

I risultati delle analisi cinematiche proposte e gli esiti delle verifiche ai sensi delle NTC18 possono essere visualizzati all’interno del sistema HT_BIM associando le informazioni ottenute come parametri delle facciate realizzate in ambiente BIM. In questo modo è possibile una consultazione semplificata dei risultati attraverso scale cromatiche per l’indicazione dell’acceleratore di attivazione del meccanismo di collasso ed attraverso una visualizzazione verde/rosso per gli esiti delle verifiche.

La metodologia permette in conclusione di ottenere informazioni relative alla vulnerabilità sismica degli edifici secondo approcci differenti. In tal modo è possibile indicare le strutture che presentano maggiori criticità ed effettuare un piano di interventi basato su più fasi.

Pensata come uno strumento utile alle amministrazioni territoriali, ai comuni, province e regioni, è sorta la necessità di fornire una “matrice decisionale” riassuntiva dei principali strumenti, tecniche, possibili applicazioni e risultati raggiungibili (Figura 4-18).

	Rilievo	Caratterizzazione dei materiali	Analisi della vulnerabilità sismica	
Livello 1 Approccio Qualitativo	Rilievo a vista Rilievo documentario Compilazione delle schede di rilievo (GNDT, CARTIS, CLE, ...)	Rilievo a vista Rilievo delle superfici Rilievo documentario	Scale macrosismiche EMS98 Schede GNDT II livello Meccanismi locali	Strumenti
	Analisi documentaria Analisi morfologica Individuazione della tipologia edilizia Dettagli e componenti a vista Stato di conservazione e degrado	Individuazione tipologia di materiali Stato fessurativo Stato di conservazione e degrado	Indice di vulnerabilità Definizione dei cinematismi di collasso	Risultati
Livello 2 Approccio quantitativo	Rilievo geometrico strumentale Stazione totale Fotogrammetria digitale Rilievo laserscanner 3D	NTC2018 Indice IQM Indagini non distruttive in situ Indagini distruttive in situ e in laboratorio	Analisi cinematiche lineari Analisi cinematiche non lineari Telaio equivalente	Strumenti
	Geometria degli elementi Dense cloud point 3D Stati deformativi degli elementi Individuazione anomalie e punti singoli	Definizione dei valori medi delle caratteristiche meccaniche Valutazione dell’omogeneità delle caratteristiche	Moltiplicatore di attivazione del meccanismo Curve di capacità del meccanismo Verifiche NTC2018	Risultati

Figura 4-18 Matrice decisionale

L’approccio di livello 1, riferendosi a un rilievo di tipo speditivo e ad analisi strutturali che forniscono una valutazione della risposta sismica di tipo qualitativo, permette fondamentalmente di individuare i possibili meccanismi di collasso per aggregati ed edifici isolati. Fornisce, quindi, una prima indicazione su scala, anche territoriale, della vulnerabilità sismica di una parte del costruito urbano che possa consentire ai tecnici e alle amministrazioni territoriali di effettuare delle considerazioni preliminari per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico. Queste comprendono anche l’individuazione di strumenti per la sicurezza e l’emergenza dei cittadini (vedi ad esempio Condizione Limite di Emergenza o urgenti interventi di manutenzione) e prevedono costi contenuti sia per il rilievo, sia per l’esecuzione delle analisi.

L’approccio di livello 2, basato su rilievi strumentali e raffinati (estesi sia alla geometria sia ai dettagli costruttivi) e modelli semplificati (analisi cinematica lineare e non lineare di meccanismi fuori piano, analisi statica non lineare con modelli semplificati a telaio equivalente, etc.), consente di ottenere una prima valutazione della vulnerabilità sismica di tipo quantitativo. Ciò chiaramente richiede un maggior impegno in termini di tempi e di costi rispetto al livello 1, dovuti principalmente al maggior approfondimento del grado di conoscenza della geometria delle strutture. Da tale livello emergono però informazioni particolarmente utili nella definizione quantitativa della vulnerabilità sismica e, pertanto, nella pianificazione di interventi finalizzati alla messa in sicurezza e/o al miglioramento degli edifici esistenti.

4.3 Bibliografia

- Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Piemonte, A., Ruschi, P., & Tenchini, L. (2017). 3D SURVEY TECHNIQUES FOR THE ARCHITECTURAL RESTORATION: THE CASE OF ST. AGATA IN PISA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Borri, A., Corradi, M., Castori, G., & De Maria, A. (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2647-2665.
- Brusaporci, S., Maiezza, P., & Tata, A. (2018). A FRAMEWORK FOR ARCHITECTURAL HERITAGE HBIM SEMANTIZATION AND DEVELOPMENT. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).

- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J. A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3), 21-29.
- Fai, S., & Rafeiro, J. (2014). Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information model (BIM)-West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 123.
- GENS, R., & VAN GENDEREN, J. L. (1996). Review Article SAR interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1803-1835.
- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55-69.
- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55-69.
- Guidi, G., Russo, M., Magrassi, G., & Bordegoni, M. (2010). Performance evaluation of triangulation based range sensors. *Sensors*, 10(8), 7192-7215.
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S. (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in construction*, 20(5), 601-609.
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311-327.
- NorMal, R. 1/88, *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*, CNR-ICR, Roma 1990.
- Pavan, A., & Mirarchi, C. *La nuova norma UNI 11337, gestione digitale delle costruzioni*.
- Pavan, A., Mirarchi, C., & Giani, M. (2017). *BIM: metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell'era digitale*. Tecniche Nuove.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017), "An integrated modeling system (BIM) for a quickly and reliable evaluation of the "interference" for the historical building aggregates: Limit Emergency Condition (CLE)", in 39°

- Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione - Territori e frontiere della rappresentazione, GANGEMI EDITORE, Napoli.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017). HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers. *DISEGNARECON*, 10(18), 5-1.
- Piermattei, L., Carturan, L., & Guarnieri, A. (2015). Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(13), 1791-1802.
- Pirotti, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2013). State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 66-78.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 21(115), 269-291.
- Saccucci, M., Cima, V., Grande, E., Imbimbo, M., & Pelliccio, A. (2019). Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia). *Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia)*, 152-162.
- Sacks, R., Kaner, I., Eastman, C. M., & Jeong, Y. S. (2010). The Rosewood experiment—Building information modeling and interoperability for architectural precast facades. *Automation in Construction*, 19(4), 419-432.
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in construction*, 38, 109-127.

CAPITOLO 5.

CASO DI STUDIO: BORGO SAN ROCCO A SORA (FR)

5.1 Introduzione

Sora è un comune italiano di circa 26000 abitanti della provincia di Frosinone nel Lazio. Per numero di abitanti è la quarta città della provincia e ventinovesima dell'intera regione. Si trova in un contesto orografico particolarmente complicato, in quanto è situata a circa 300 m.s.m. a ridosso dell'Appennino Centrale, al confine tra Lazio e Abruzzo. Sorge orge nel punto di incontro di tre valli: Valle Roveto, Val Comino, Valle del Liri ed è attraversata dall'omonimo fiume che dà il nome alla valle, il fiume Liri. Il centro abitato anticamente era compreso fra il Monte San Casto (m. 546) e le rive del Liri mentre, attualmente, è molto più esteso occupando quasi tutta la piana del Liri all'uscita della Valle Roveto (Branca 1847). Tale espansione è stata possibile soprattutto dopo gli anni '50 con la ripresa economica e l'aumento demografico. Infatti, agli inizi del secolo, e, soprattutto prima del devastante terremoto del 1915, l'urbanizzazione di Sora si concentrava in special modo sulle sponde del Liri. Dopo la metà del '900 la città comincia a crescere e nuove costruzioni sorgono lungo le arterie principali che collegano la città al circondario (Figura 5-1).



Figura 5-1 Inquadramento geografico del centro storico di Sora

A poca distanza dal centro storico della città è situato Borgo San Rocco, un aggregato strutturale con origini che risalgono XVIII secolo. Per svariati motivi esso rappresenta un interessante caso di studio sia per la sua posizione geografica, è infatti ubicato in una posizione particolare avendo da un lato il fiume Liri e dall'altro l'acclive del Monte San Casto ed è quindi esposto a rischi di tipo idrogeologici che dal punto di vista strutturale poiché si presenta come due mega aggregati strutturali tra loro interconnessi (Figura 5-2).

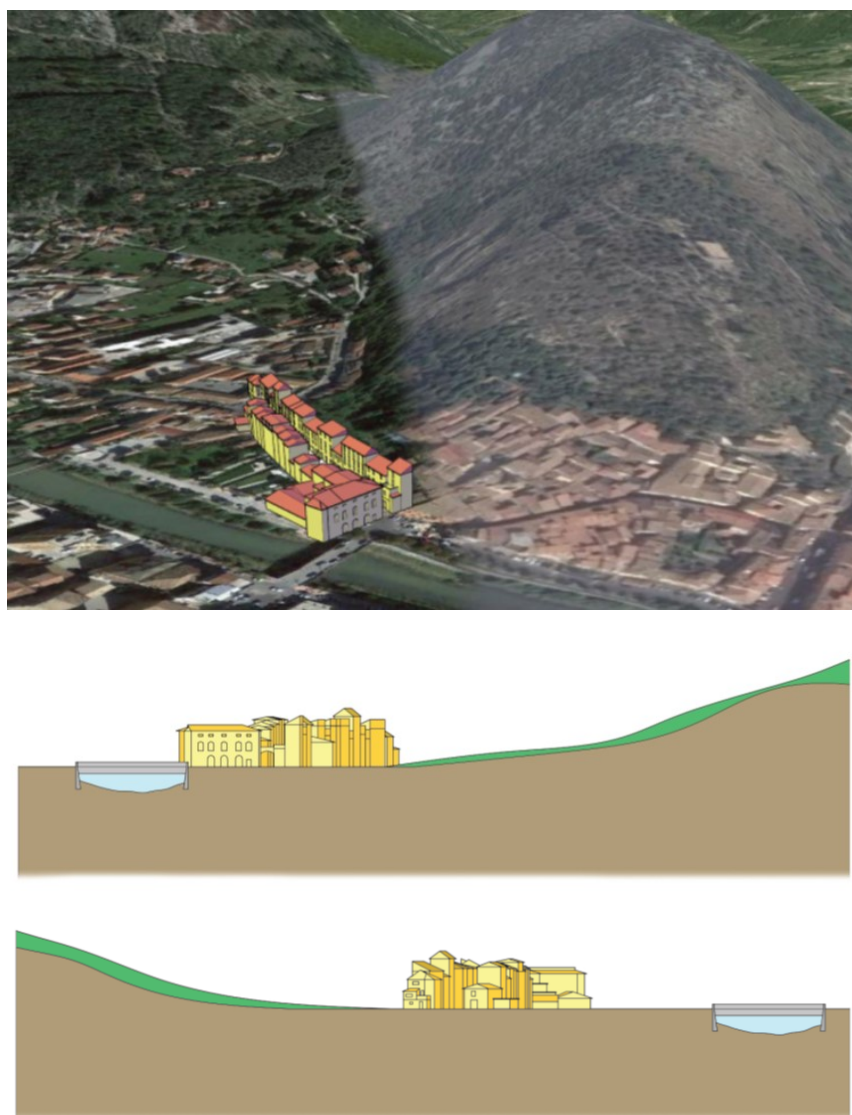


Figura 5-2 Foto-inserimento di Borgo San Rocco e sezioni dell'aggregato strutturale

Nel passato Sora è stata interessata da una significativa attività sismica (Figura 5-3), trovandosi in prossimità della catena appenninica, come si evince dai dati forniti dal

Database Macrosismico Italiano DBMI15 (versione DBM15), pubblicato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – I.N.G.V. (Locati et al. 2016).

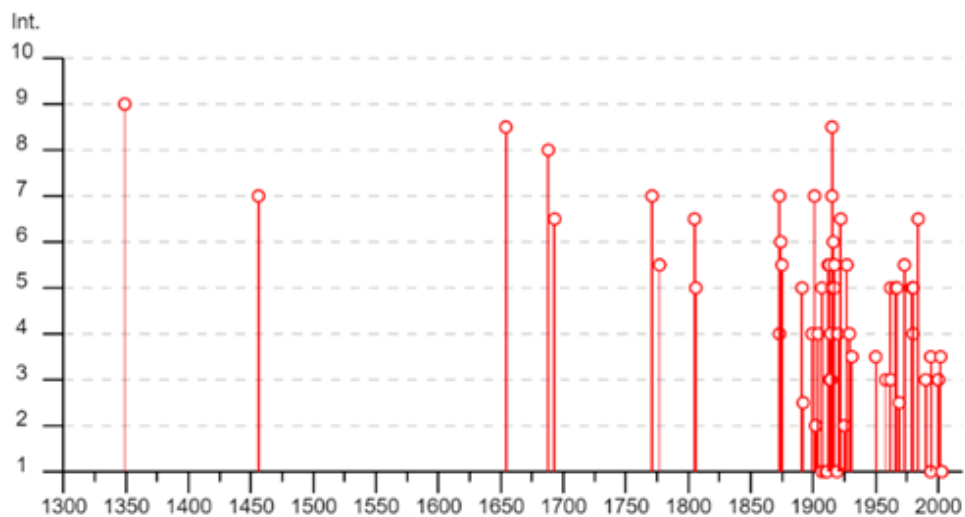


Figura 5-3 Intensità macrosismiche degli eventi sismici storici risentiti a Sora (DBMI15)

Borgo San Rocco rappresenta l'unica connessione tra la periferia della città e gli edifici strategici della stessa. In caso di evento sismico è di fondamentale importanza che l'aggregato preservi la sicurezza in modo da garantire la fruibilità delle vie di connessione (Figura 5-4).



Figura 5-4 Sistema di gestione dell'emergenza del Comune di Sora

Per la sua conformazione, inoltre, è un lampante esempio di street canyon soggetto a fenomeni di degrado ambientale come l'esposizione solare, l'incidenza dei venti e l'azione dell'acqua (Figura 5-5).



Figura 5-5 Vista aerea del centro storico di Sora ed ubicazione di Borgo San Rocco

Volendo prendere come riferimento il seguente caso di studio sono state applicate le due analisi di tipo qualitativo la prima e quantitativo la seconda descritte precedentemente come illustrato di seguito.

5.2 Analisi qualitativa di primo livello

5.2.1 Inquadramento storico

Per poter redigere una analisi qualitativa è stato necessario effettuare una accurata ricerca storica dello sviluppo urbanistico della città, punto di partenza per una successiva analisi dell'edificato. Le informazioni sono state reperite attraverso la consultazione dei documenti disponibili negli archivi comunali, nelle biblioteche locali e in rete.

Dalla preistoria al tardo Impero Romano

Il territorio di Sora è stato costantemente abitato fin dall'antichità come dimostrano i numerosi ritrovamenti effettuati da Giustiniano Nicolucci nella seconda metà del

secolo scorso e le recenti scoperte operate da Italo Biddittu in località Valle Radice e Carnello, frazioni limitrofe al comune. Dai dati pubblicati dal Biddittu emerge che i reperti fanno riferimento al Paleolitico medio. Sempre in località Carnello sono stati rinvenuti frammenti ceramici dell'età del bronzo e alcuni frammenti dell'età del ferro. Della stessa età, ma in maggior quantità, sono stati trovati manufatti sul Monte San Casto in particolare in via Spinelle, strada che lambisce il versante occidentale del monte (Figura 5-6). Ciò è una valida testimonianza di un consistente insediamento in quella zona, già a partire dalla preistoria. Certamente sulla scelta di questa zona per insediamenti così antichi è stata determinante la presenza di importanti corsi d'acqua. Il fiume Liri influisce sicuramente sulla produttività agricola ed è un ottimo baluardo difensivo “abbracciando” la parte più antica dell'abitato.



Figura 5-6 Piccolo frammento di corno con una serie di incisioni lineari parallele

Nell’VIII-VII secolo a.C. il territorio di Sora posto allo sbocco della Valle di Roveto, fu percorso da gruppi cosiddetti protosabini e da genti che si dirigevano verso il Tirreno, in particolare verso le fertili pianure pontine. Con la fine del VI secolo a. C., e più precisamente con il crollo dell’egemonia etrusca nell’Italia centrale, nell’area di Sora si stabilirono tribù dei Volsci. A tali tribù si deve attribuire la costruzione dell’imponente cinta muraria in opera poligonale. Le mura, costruite con grossi blocchi di calcare locale secondo la tecnica della seconda maniera, poggiano prevalentemente sul vivo banco di roccia (Figura 5-7) (Figura 5-8).



Figura 5-7 Resti delle mura poligonali presenti su Monte San Casto



Figura 5-8 Mura in opera poligonale

La funzione strategico-militare e di controllo viario di questo territorio di confine, vocato al commercio e interessato dalla transumanza, fu causa di contesa tra i Sanniti e i Romani. Nel 306 a. C. avviene la definitiva conquista della città da parte dei Romani. Negli anni successivi essa svolse l'importante ruolo di base logistica e strategica per i Romani, sino alla fine della terza guerra sannitica. Tre fatti dimostrano quale fosse la grande importanza che i nuovi venuti attribuivano a Sora:

- 1) L'istituzione di una colonia latina (303 a. C.) con un altissimo numero di coloni (4.000 con le loro famiglie, quindi in tutto oltre 12.000 persone);
- 2) L'immediata costruzione di un imponente tempio, innalzato presso il primo forum di Sora;
- 3) La successiva realizzazione di un tronco stradale che praticamente, attraverso la Via Roveto, permetteva di riunire la Via Valeria con la Via Latina.

Nell'88 Sora ebbe la cittadinanza romana e diventò (con la Lex Julia Municipalis) municipio di pieno diritto. Da questo momento avviene nel centro di Sora una profonda trasformazione, con un forte risveglio economico, contrassegnato anche dall'incremento e dal miglioramento delle strutture pubbliche e dalla ristrutturazione urbanistica, con un consistente mutamento della composizione demografica e con notevoli conseguenze nella stessa sfera religiosa. L'importanza assunta da Sora come nodo di comunicazioni, centro industriale e di lavorazione artigianale (cave di

travertino e calcare, lavorazione della pietra e del legno) e centro di commerci riguardanti i cereali, la carne, la lana, il vestiario, ecc., favorì l'emergere di un ceto che godeva di una solida condizione economica. Si trattava di magistrati, militari, sacerdoti di culti diversi, ma anche di liberti impegnati negli affari, nei commerci e nelle professioni. Era questa una classe che voleva lasciare il segno e il ricordo della propria esistenza attraverso la testimonianza dei monumentali sepolcri, eretti lungo le principali strade extraurbane e ricchi di rilievi, sculture e fregi, realizzati in laboratori artigianali specializzati, secondo il gusto proprio dell'ellenismo. Si realizza in questo periodo, su un nuovo percorso, il primo tratto rettilineo della strada fra Sora e Cereatae, l'odierna Casamari. Con l'età Augustea la città fu arricchita e dotata di edifici ed opere di carattere pubblico, come la basilica Caesaris e l'acquedotto. Quest'ultimo captava le abbondanti acque del Lacerno che in parte ancora oggi alimentano l'acquedotto cittadino. Ancora oggi a Sora rimangono conservati alcune strutture di epoca Romana come la basilica San Domenico (Figura 5-9) e un'arcata del ponte Marmone (Figura 5-10). Nel 161 Giuliano, soldato dalmata, viene a Sora per predicare il cristianesimo. Subisce il martirio nel tempio di Serapide (oggi chiesa di San Giuliano). Successivamente il numero dei cristiani crebbe al punto che Sora fu designata come sede vescovile immediatamente soggetta al Pontefice (Beranger, 1995).



Figura 5-9 La basilica di San Domenico a Sora



Figura 5-10 Arcata del ponte Marmone

Nel 702 Sora è gastaldato longobardo alle dipendenze di Gisulfo I duca di Benevento e diventa capoluogo del gastaldato longobardo della valle del Liri. Successivamente, dopo essere stata donata nel 744 al monastero di Montecassino, nel 787 Carlo Magno dona allo Stato della Chiesa le città di Sora, Arpino, Arce, Aquino, Capua e Teano. Malgrado queste donazioni, la città rimase tuttavia politicamente soggetta all'amministrazione longobarda. Già da queste prime indicazioni emerge una delle caratteristiche fondamentali di tutta la storia medievale di Sora: una città di confine tra il territorio amministrato dalle varie dominazioni dell'Italia meridionale e quello sottoposto all'autorità papale. Distrutta nel 937 dagli Ungari, Sora passò nel 970 da semplice gastaldato a contea. La contea Sorana dopo essere stata all'inizio dell'XI secolo in possesso di Montecassino, passò nel 1062 sotto il dominio Normanno. In questo periodo Sora fu due volte incendiata: nel 1113 e nel 1156. Da quest'ultimo incendio rimane illesa solo la chiesa di santa Restituta. Dovette attendere ben undici anni dopo questa seconda distruzione per essere nuovamente interessata dalle prime opere di ricostruzione. Nel gennaio del 1208 la città fu riconquistata dal papa che le concesse numerose libertà. Nel 1229 le truppe dell'imperatore rasero al suolo Sora. Federico II ne impedì in seguito la ricostruzione. Alla sua morte, dopo la terribile punizione, la ricostruzione fu lenta ed ebbe inoltre una battuta di arresto nel 1252, quando Sora, che si era schierata ancora dalla parte dei pontefici, in occasione delle lotte fra Innocenzo IV e Corrado IV, fu saccheggiata dagli imperiali. Nel 1349 ci fu un violentissimo terremoto che frenò la crescita urbana di Sora (Galli et al., 2009).

I secoli dei Signori- il Ducato di Sora

Nel corso del XV secolo la città fu retta da vari signori, tra i quali i Tomacelli, i Cantelmo, i Della Rovere. Il secolo XVI si apre con l'infelice tentativo di Cesare Borgia di conquistare la città saldamente tenuta nelle mani del duca Francesco Maria Della Rovere. Nel 1580 papa Gregorio XIII acquista il ducato di Sora dai Della Rovere per donarlo al nuovo duca Giacomo Boncompagni, suo figlio. Nel 1582 lo stesso Gregorio XIII avrà dal marchese del Vasto, Alfonso d'Avalos, anche le vicine Aquino, Arpino, Arce, Roccasecca che costituiscono parte integrante del feudo sorano fino al 1796. Nel 1796 Sora cessava di essere feudo dei Boncompagni. Antonio II Maria, ottavo duca di Sora, vendette a Ferdinando IV di Borbone re di Napoli lo stato di Sora in cambio di alcuni beni, già di proprietà reale, esistenti nel limitrofo stato della chiesa. Questi furono due secoli di sviluppo urbano e viario, di fervore culturale e devozionale, di progresso nell'agricoltura e di attività manifatturiere, ma l'età dei Lumi e le conseguenze della rivoluzione francese, minacciarono ripercussioni politiche anche nel territorio Sorano (Leonardi, 2010).

Pochi anni più tardi, con l'avanzata delle truppe francesi in tutta Italia e la proclamazione della Repubblica partenopea, la città fu proclamata distretto della provincia di Terra di Lavoro e fu poi centro d'azione della resistenza anti-giacobina.



Figura 5-11 Provincia di Terra di Lavoro

L'inizio dell'800 trova Sora inserita nel Regno di Napoli. A seguito delle riforme napoleoniche, la provincia di Terra di Lavoro fu suddivisa in quattro distretti: Sora, Capua (che poi divenne Distretto di Caserta), Nola e Gaeta. Sora comprendeva dieci Circondari: Sora, Arpino, Alvito, Atina, Arce, Roccasecca, S. Germano (oggi Cassino), Cervaro, Venafro e Colli al Volturno. Capua, poi Caserta, furono i capoluoghi della Provincia di Terra di Lavoro. È il periodo in cui si avvia la industrializzazione, specialmente della zona di Isola del Liri (allora ancora chiamata Isola di Sora) ad opera di imprenditori francesi (Lefebvre) per il settore della carta, ma anche italiani (Lorenzo Zino) nel settore tessile. In passato l'utilizzo degli stracci come materia prima di produzione della carta, fece guadagnare agli abitanti di Sora l'appellativo di *cenciari*, essendo questi dediti alla raccolta e successivamente al commercio di questa importante materia prima per la produzione cartaria. Nella seconda metà dell'800, invece, dagli stracci si passò alla pasta di legno e si sviluppò una decisiva meccanizzazione del processo. Tale meccanizzazione, oltre a modernizzare la produzione dal punto di vista tecnico, generò conseguenze importanti dal punto di vista sociale. Soprattutto per quanto riguarda il settore laniero infatti, l'introduzione di nuovi macchinari ebbe riflessi negativi sull'occupazione e sull'impiego di manodopera, in particolare quello della filatura, svolto in gran parte dalle donne. A differenza dell'industria laniera, che nel periodo immediatamente successivo all'unificazione si disgrega fino a scomparire, l'industria cartaria regge meglio il confronto con la nuova realtà grazie ad una struttura industriale più incline alla modernizzazione. Ugualmente anche i collegamenti con l'Abruzzo venivano migliorati mediante l'apertura della strada per Avezzano (Santangelo, 2017).

Dopo l'unità l'assetto urbano subisce profonde trasformazioni. La città comincia ad espandersi oltre il Liri e nelle campagne. Il secolo si conclude con la realizzazione dell'acquedotto (con presa alle sorgenti del Carpello immissario del lago di Posta Fibreno); della ferrovia Avezzano - Sora - Roccasecca, da cui è possibile proseguire, sempre in treno, per Napoli; lo sviluppo di un nuovo quartiere abitativo attorno alla stazione; l'impianto d'illuminazione elettrica in ogni strada ed in ogni casa del centro cittadino. Sorgono insediamenti di lavorazione di filati di lana, botteghe artigiane di ebanisti, ramai e battitori di ferro, mentre la produzione agricola conosce un grave

degrado fino a determinare, con varia fortuna, le prime emigrazioni verso le regioni centrali dell'Europa e verso le Americhe che si arresteranno solo verso il 1960.

Il 13 gennaio 1915 Sora fu interessata da una fortissima e prolungata scossa che fece crollare circa il 50% del fabbricato, seppellendo circa quattrocento dei 15000 abitanti. Malgrado ciò, la risorsa naturale del fiume, sfruttato per l'energia elettrica, aiutò le sorti di questa terra che dagli inizi del Novecento visse una grande espansione economico- industriale perseguita negli anni, tanto che oggi Sora è una delle più attive realtà della Ciociaria (Martini, 1982).

Da un punto di vista politico, invece, il territorio della provincia di Frosinone nel periodo antecedente al 1927 era diviso amministrativamente tra il circondario di Frosinone, appartenente alla provincia di Roma, e il circondario di Sora, facente parte della provincia di Terra di Lavoro. L'unificazione territoriale dei due circondari, attuata con delibera del Consiglio dei Ministri del 6 dicembre 1926 e del Regio Decreto del 2 gennaio 1927, n.º 1, portò alla creazione della nuova provincia di Frosinone, di cui Sora ne fa parte ancora oggi.

Nel corso del secondo conflitto mondiale, il territorio sorano diviene il centro logistico più importante della linea Gustav, il fronte sul quale si difendevano le truppe tedesche. Sora, pure dichiarata "città ospedale", posta nelle immediate retrovie del fronte di Cassino, subirà lo stesso molte incursioni aeree che lasceranno profonde ferite nell'abitato e tra la popolazione, con numerosi morti e feriti. Sora risorgerà più bella e anche più ampia, con lo sviluppo del centro urbano, in sinistra del fiume Liri, incentrandosi sullo sviluppo del settore scolastico e in quello sanitario.

Oggi Sora è una città che proprio per la sua posizione, vive sul suo ruolo di incrocio tra diverse regioni e tradizioni, sviluppatasi sul settore commerciale, sull'economia e dell'arredamento.

5.2.2 Evoluzione storica-urbanistica

Per poter studiare l'evoluzione urbanistica che il centro storico ha subito nelle varie epoche, bisogna analizzare e confrontare la conformazione degli aggregati urbani, su cartografie relative ad ogni epoca. In realtà le uniche cartografie ufficiali si hanno solamente a partire dal '800. Per le epoche precedenti, i soli documenti cartografici

conservati in cui Sora sia stata ritratta, sono raffigurazioni del '600, di taglio prospettico, con proiezione verticale obliqua, che peccano in fedeltà rispetto al soggetto reale. Si tratta di un dipinto di F. Vanni, un altorilievo a stucco e una litografia. Pertanto si è dovuti ricorrere a cartografie orografiche attuali e formulare su di esse delle ipotesi, sulla tipologia di impianto e sulle caratteristiche costruttive di quelle epoche.

Studiando l'evoluzione storico-urbanistica del centro storico, è stato possibile individuare degli elementi risalenti all'epoca Romana. Nello specifico notiamo un ampio asse di attraversamento costituito dall'attuale corso Volsci, il quale rappresenta un prolungamento della via che scende dalla Marsica verso il basso Liri, aperta già dai Volsci durante la loro calata verso il mare. In linea con la strada si collocava l'antico ponte, che sorgeva pochi metri più ad est dell'attuale ponte di Napoli. Si può identificare anche un'altra strada secondaria, disposta ortogonalmente rispetto all'asse principale, in linea con il ponte romano sostituito nel 1883 dal ponte San Lorenzo. Con ciò è possibile intravedere uno schema planimetrico regolare che ha caratterizzato l'urbanistica romana, che vede l'intersezione di strade principali e strade secondarie, le quali dividono lo spazio in isolati regolari. L'urbanistica romana, trovò le sue basi proprio nella storia greca. La razionalità dei Greci sarebbe stata applicata anche alla progettazione urbana. Ippodamo da Mileto per primo, teorizzò la necessità di costruire le città secondo schemi planimetrici regolari. Se difatti fino ad allora nascevano prima le case e nello spazio tra esse venivano costruite le strade, con la pianificazione urbana teorizzata da Ippodamo da Mileto, venivano prima disegnate le strade e poi, tra esse, trovavano posto gli edifici. Con ciò si potevano ottenere città con tracciati viari tra loro perpendicolari. La scacchiera tipica ipotizzata da Ippodamo da Mileto si basava su tre assi longitudinali, detti decumani, che procedevano in direzione est-ovest, intersecati da assi perpendicolari, detti cardo, secondo l'orientamento nord-sud. L'intersezione di questi assi viari determinava isolati rettangolari dalla forma allungata. (Figura 5-12)

TIPOLOGIA DI IMPIANTO:

- Strada di collegamento con la Marsica, aperta già dai Volsci.
- Ampio asse di attraversamento principale costituito dal Corso Volsci
- Strada secondaria, perpendicolare al Corso Volsci.

■ **IMPIANTO IPPODAMEO:** nato con Ippodamo da Mileto si basava su assi longitudinali, detti decumani,, intersecati da assi perpendicolari, detti cardì; dividono lo spazio in isolati rettangolari e ben squadri.



Figura 5-12 Intersezione decumani e cardì

Questa tipologia di impianto viene detta *Ippodameo*: lo ritroviamo nel primo aggregato storico di epoca Romana, a Sora, come evidenziato in Figura 5-13.

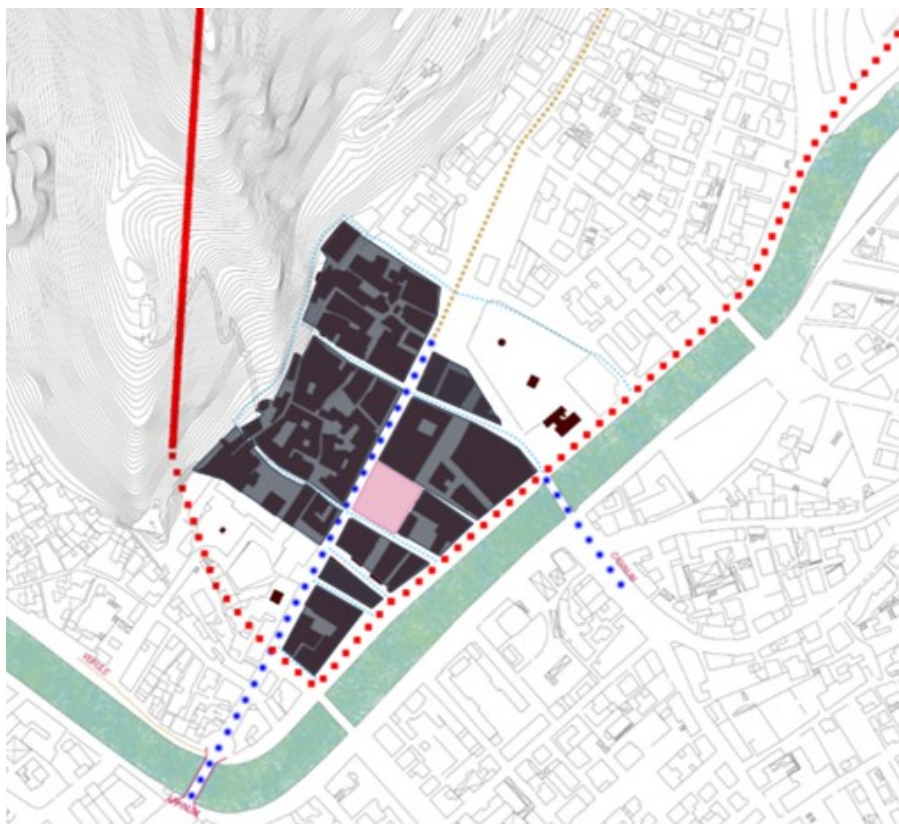


Figura 5-13 Impianto ippodameo del centro storico di Sora

Per quanto riguarda invece le caratteristiche costruttive, molti degli edifici facente parte di questo aggregato di epoca romana erano sicuramente caratterizzati da una tipologia strutturale, formata da mattoni in laterizio con un nucleo di malta centrale.

Nell'impianto medievale, elemento caratterizzante è la cinta muraria che racchiudeva al suo interno il centro storico, essenziale per la difesa del territorio. A differenza di molte altre città, Sora non fu mai rasa al suolo dai barbari, ma fu occupata ad esempio dai longobardi che tendevano ad assediare la città solo dall'esterno fino alla sua resa. Proprio grazie a ciò, Sora conserva ancora il suo impianto romano e molte delle sue costruzioni romane. La limitazione entro le mura costringeva una costruzione di edifici densa e non regolare. Il vincolo per un'espansione dell'edificato dipendeva, però, anche dal fatto che l'area geografica scelta per l'ubicazione della città era da un lato ostacolata dal monte, dall'altro bloccata dal fiume. Allo stesso tempo però, questi due elementi insieme costituivano un'ulteriore protezione naturale per la città (Figura 5-14).

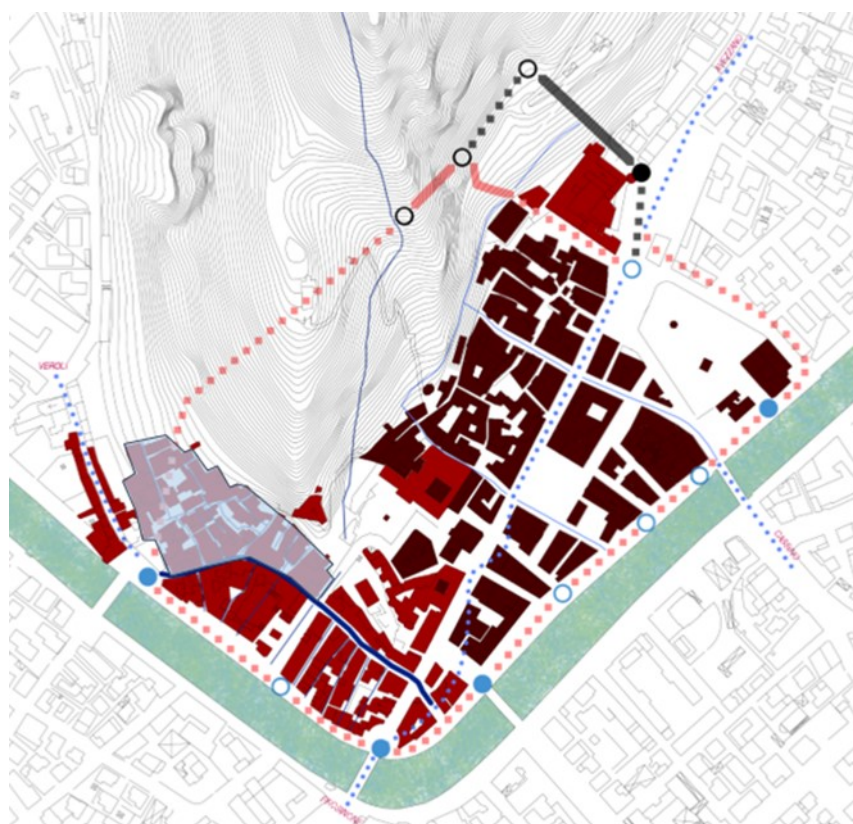


Figura 5-14 Impianto a fuso e presenza della cinta muraria medievale nel centro storico di Sora

Inoltre, si può individuare una seconda area nata in epoca medievale (Figura 5-15) che rivela un aggregato piuttosto regolare, formato da isolati ben squadrati paralleli rivolti verso il fiume. Questa tipologia di impianto prende il nome di *impianto a pettine*, e lo ritroviamo anche in località di mare come Gaeta e Chioggia. Infatti esso risulta tipico di città la cui economia era basata essenzialmente sulla pesca.

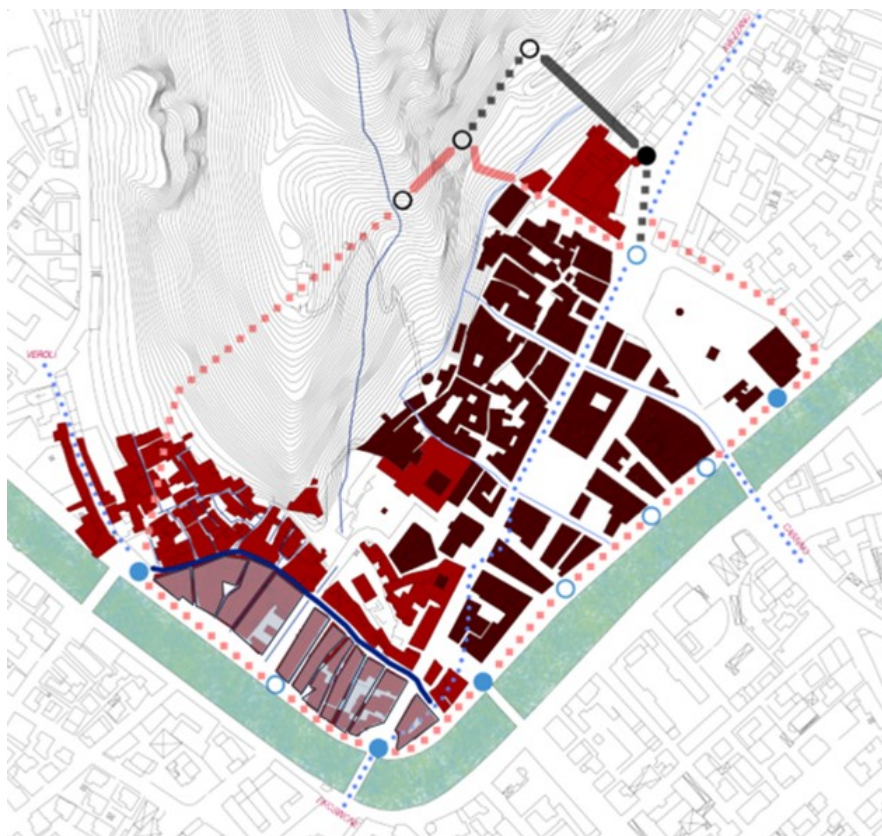


Figura 5-15 Impianto a pettine di epoca medievale del centro storico di Sora

La differenza però tra la regolarità strutturale dell'impianto ippodameo di epoca Romana e l'impianto a pettine medioevale risiede in una differenza dal punto di vista delle caratteristiche strutturali dell'edificato. Mentre in epoca romana risultava essere regolare con l'*opus laeticum*, in epoca medievale troviamo sezioni piene costituite da materiale piuttosto irregolare, non lavorato e di caratteristiche varie, come mostrato in Figura 5-16.

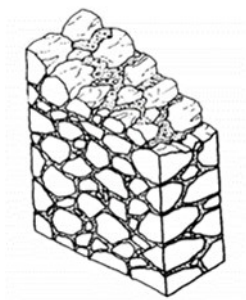


Figura 5-16 Sezione piena in associazione con paramenti in materiale non lavorato o spaccato

In epoca rinascimentale invece non ci fu alcun stravolgimento dell'impianto urbano, ma viene conservato essenzialmente quello delle epoche precedenti. Non si sviluppano più degli aggregati, ma nascono per di più edifici isolati e tra questi ritroviamo edifici di una certa rilevanza come municipi, cattedrali e chiese (Figura 5-17).

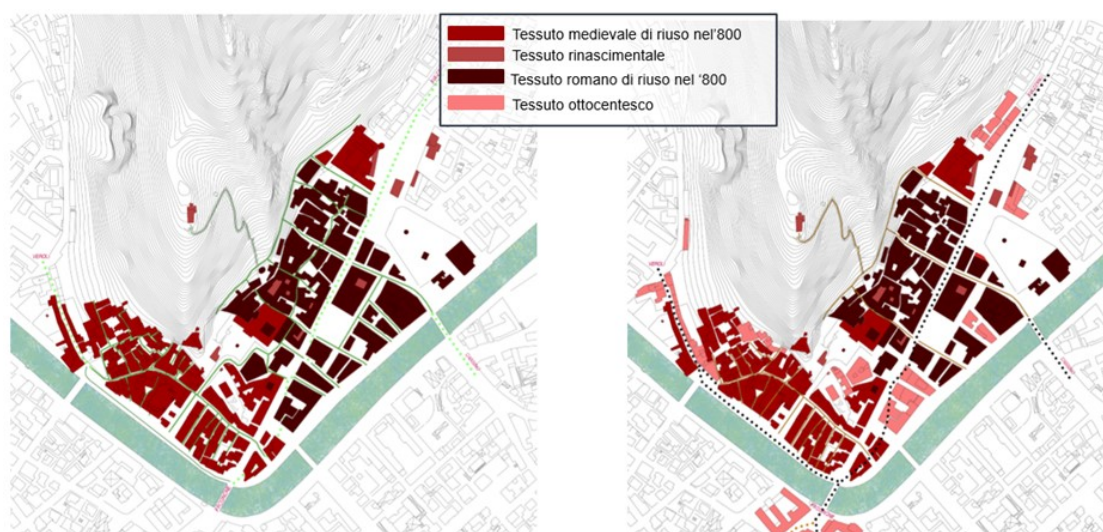


Figura 5-17 Impianto periodo rinascimentale e inizi '800 del centro storico di Sora

Come spiegato precedentemente, agli inizi dell'800 Sora entra a far parte del distretto di Terra di Lavoro: la città incomincia ad inquadrarsi maggiormente da un punto di vista politico e tra l'altro cominciano a comparire anche le prime cartografie ufficiali. Questo passaggio è fondamentale per avere una certezza dello scenario urbanistico a quel tempo. Con la prima cartografia catastale del 1876, infatti, vediamo come l'impianto a pettine e l'impianto a fuso risalenti all'epoca medievale risulta ancora presente così come avevamo ipotizzato, cosa diversa per la zona circoscritta

evidenziata in Figura 5-18, in quanto avevamo supposto una regolarità dell'aggregato strutturale, ma ritroviamo invece una profonda irregolarità nella disposizione degli edifici e nella viabilità generale.



Figura 5-18 Carta catastale del 1876

La discordanza riscontrata nel XIX secolo, descritta nel paragrafo precedente, viene superata analizzando lo scenario del '900. Ci furono, infatti, due avvenimenti che modificarono gran parte del tessuto edilizio del centro storico. In primis il terremoto del 1915 che distrusse il 50% del fabbricato, come si evidenzia dalla carta in Figura 5-19.



Figura 5-19 Carta presente all'ufficio tecnico del comune di Sora

In seguito assistiamo a una prima ricostruzione della città, ma risulta ancora fortemente irregolare come si evidenzia dalla carta catastale del 1926. L'anno dopo invece, fu attuato un nuovo piano di ricostruzione del centro storico, che dal punto di vista urbanistico intende regolarizzare il centro storico di Sora e dotarlo di maggiori aperture, facendo un taglio artificiale sulla collina. Come si vede nella Figura 5-20, Via Branca era un continuum con via Cittadella: ad oggi le troviamo divise in quanto è stata tolta una campata alla prima fila di case, detraendole di circa 2-2,5 metri. Sempre con questo piano, si crea il Corso Volsci con assi viari perpendicolari ad esso, che lo collegano con il lungo fiume Liri. Questa griglia, rappresenta proprio una sorta di impianto romano con intersezione di decumani e cardì. Si può notare anche che la Chiesa di Santa Restituta si trova disposta diversamente da come lo era prima. Ciò permette la nascita della Piazza Cesare Baronio, che collega la zona est con la zona ovest.



Figura 5-20 Carta catastale del 1926 e carta catastale del 1939

5.2.3 Il Borgo San Rocco

Il Borgo San Rocco, caso di studio per l'applicazione della metodologia sorge direttamente all'esterno delle mura che cingevano la cittadina durante il medioevo. Le notizie precedenti al rinascimento purtroppo non sono molte e ancor meno sono quelle che possono fornire informazioni su Borgo San Rocco. Con certezza si ha notizia del fatto che inizia ad assumere la conformazione odierna, cioè di insediamento di pianura con morfologia urbana sviluppata entro i margini (il fiume Liri da un lato e Monte San Casto dall'altro) nel XVI secolo, quando viene costruita la prima chiesa intitolata a San Rocco. La sua posizione, esterna rispetto alle mura del centro storico, probabilmente è dovuta al fatto che San Rocco è il santo considerato protettore dal terribile flagello della peste. Era infatti pratica comune allontanare le persone affette dal morbo dal centro cittadino per evitare il contagio di tutta la popolazione.

In un dipinto di Francesco Vanni del 1604, conservato ancora oggi nella Chiesa di Santa Maria degli Angeli dei Passionisti tra le figure di San Francesco e di Santa Restituta, è riprodotta in proiezione verticale la città di Sora. Si tratta della prima raffigurazione della città durante il governo dei duchi Boncompagni (Figura 5-21).



Figura 5-21 Dipinto di F. Vanni (1565-1610)

Un'altra rappresentazione della città è offerta da un altorilievo in stucco risalente alla prima metà del XVII secolo, conservato presso l'attuale Palazzo Ducale di Isola

del Liri, un tempo Castello dei Boncompagni, su cui è possibile leggere la seguente iscrizione: “Sorae Civitas Romanr Colonia” (Figura 5-22).



Figura 5-22 Altorilievo in stucco del XVII secolo

Altra rappresentazione urbanistico- topografica della città è una preziosissima incisione su rame recante numerosi particolari e dettagli. L'incisione risale alla fine del 1600 ed è inserita nell'opera “Il Regno di Napoli in prospettiva divisa in dodici provincie” dell'Abate Giovan Battista Pacichelli, edito a Napoli nel 1703 (Figura 5-23).



Figura 5-23 Litografia tratta dall'opera di G. B. Pacichelli

In tutte le immagini si può osservare una Sora seicentesca, in cui si vede con chiarezza lo sviluppo del tessuto urbano dell'epoca, il fiume Liri che abbraccia e circonda la città e il profilo di monte San Casto che la sovrasta. La città si presenta come un grosso borgo, con strade e piazze spaziose ed è chiaramente visibile, nella parte sinistra delle rappresentazioni, Borgo San Rocco, ancora non nella sua completa estensione.

Solo tra la fine del XVIII e il XIX secolo Borgo San Rocco si sviluppa nella sua interezza, attorno a quella che è la nuova chiesa intitolata a San Rocco, ricostruita tra il 1750 e il 1754. Nasce come un borgo in cui fioriscono molte attività artigiane e commerciali come è possibile desumere anche dalla planimetria catastale dell'inizio del '700 in cui il borgo, non ancora completamente sviluppato osservabile in alto a sinistra nella Figura 5-24, si affaccia direttamente sul fiume Liri ancora senza opere per la delimitazione degli argini.



Figura 5-24 Foglio catastale del centro storico di Sora. 1700 ca

Cosa ben diversa si osserva nella mappa catastale del 1876 dove la conformazione di borgo San Rocco, chiaramente riconoscibile a sinistra in Figura 5-25, è poco dissimile dalla configurazione attuale.



Figura 5-25 Foglio Catastale del centro storico di Sora. 1876

5.2.4 Il rilievo del Borgo

Successivamente all'analisi storico-urbanistica si è proceduto all'esecuzione di un rilievo per la valutazione e la conoscenza dello stato attuale del borgo.

Sono stati eseguiti diversi sopralluoghi sul sito in cui si è osservato che Borgo San Rocco è costituito da due cortine edilizie assimilabili a due grandi aggregati strutturali caratterizzati da densi nuclei abitativi. La zona è connotata dalla cosiddetta Porta San Rocco, conosciuta anche come Arco di San Rocco, che a partire dalla metà del XIX secolo oltre a ridefinire i confini della città diviene essenzialmente l'elemento di collegamento tra i due edifici contrapposti, entrambi di proprietà della famiglia Marsella. Con il passare del tempo, l'arco non solo rappresenta un elemento di pura interconnessione tra i due comparti, ma assume un carattere sempre più distintivo per l'intera area, poiché oltre di esso si apre la stretta strada che collega l'intero centro storico di Sora alla chiesa di San Rocco, situata all'estremità opposta del borgo (Figura 5-26).



Figura 5-26 Arco di San Rocco a Sora

Esso presenta un andamento in direzione N. N. O., un'estensione longitudinale massima di 146m e una dimensione trasversale che varia tra un minimo di 4m a un massimo di 11m. Benché sorto in epoca successiva, Borgo San Rocco presenta tutte le caratteristiche tipiche dei borghi medievali, cioè un impianto simile alla forma di un fuso, costruito in pianura alle pendici del monte San Casto, che lo proteggono da un lato, e fiancheggiato dal fiume Liri dall'altro, tutti elementi che all'epoca conferivano protezione agli aggregati urbani da eventuali incursioni ed espugnazioni. Queste caratteristiche, unite alle tecnologie costruttive impiegate e, in generale al modo di costruire dell'epoca, hanno permesso la naturale realizzazione di quella particolare conformazione urbanistica che caratterizza il borgo, cioè quella di uno street canyon.

Presso l'Ufficio Tecnico Comunale di Sora è stata recuperata tutta la documentazione disponibile riguardante il borgo, in particolare quella più recente relativa al "Rilievo e progetto di interventi di riattazione e adeguamento igienico-funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 di Borgo San Rocco", redatta nel 1984 e attuata in modo unitario dallo stesso Comune (Figura 5-27).



Figura 5-27 Testata del documento di archivio “Rilievo e progetto di interventi di riattazione e adeguamento igienico-funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 di Borgo San Rocco”

Tale materiale risulta suddiviso in due sotto-progetti, uno per cortina edilizia, che le suddivide in Comparto Fiume Liri e Comparto Monte San Casto. Gli elaborati sono in scala 1:100 e per ogni comparto si ha a disposizione le piante dei vari livelli, un prospetto (quello interno al canyon), una sezione longitudinale e la pianta delle coperture. Per comodità tutto il materiale è stato scannerizzato e digitalizzato, di seguito sono riportate le suddette rielaborazioni (Figura 5-28).

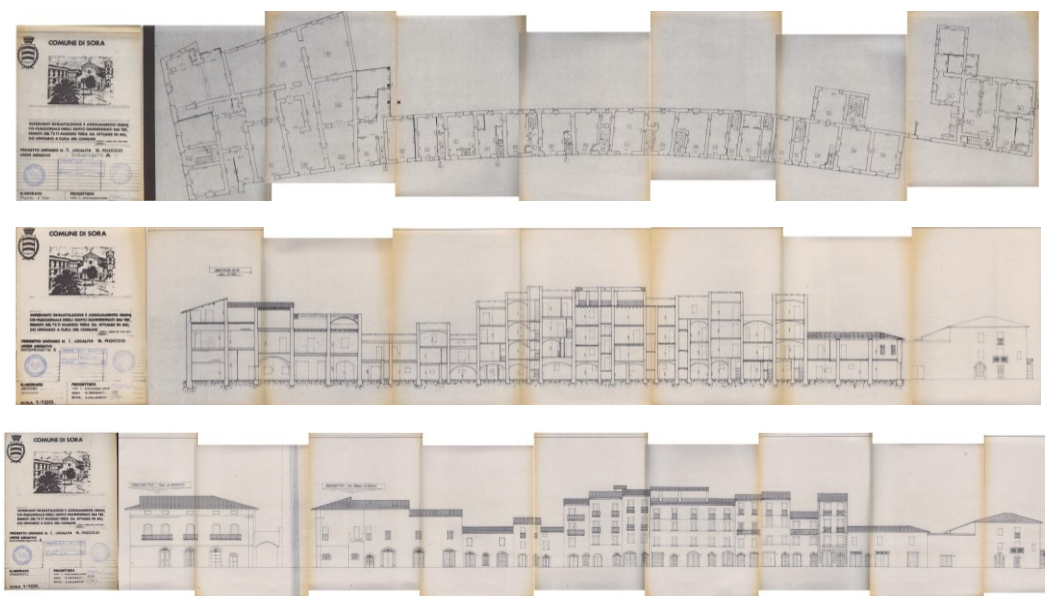


Figura 5-28 Piante, prospetti e sezioni di archivio

Le due cortine edilizie che si fronteggiano nel borgo sono costituite da 36 unità strutturali, le quali si presentano come due grandi aggregati, poiché le singole unità hanno i muri perimetrali in comune o sono collegate tra loro mediante sistemi ad arco. Gli edifici hanno altezza variabile tra i due e i quattro piani fuori terra. Per poter identificare univocamente ogni singolo edificio appartenente alle due cortine edilizie è stato individuato ed assegnato l'identificativo agli aggregati strutturali di Borgo San Rocco, denominati comparto A per l'aggregato rivolto verso il fiume Liri e comparto B l'aggregato verso Monte San Casto.

- Il Comparto A è costituito da 20 Unità Strutturali:
- Il Comparto B è costituito da 16 Unità Strutturali

I due comparti sono interconnessi a mezzo di un arco che fa sì che Borgo San Rocco sia considerato un unico mega - aggregato strutturale e non due aggregati strutturali separati. Dunque il numero di unità strutturali che lo costituiscono è complessivamente di 36 elementi (Figura 5-29).

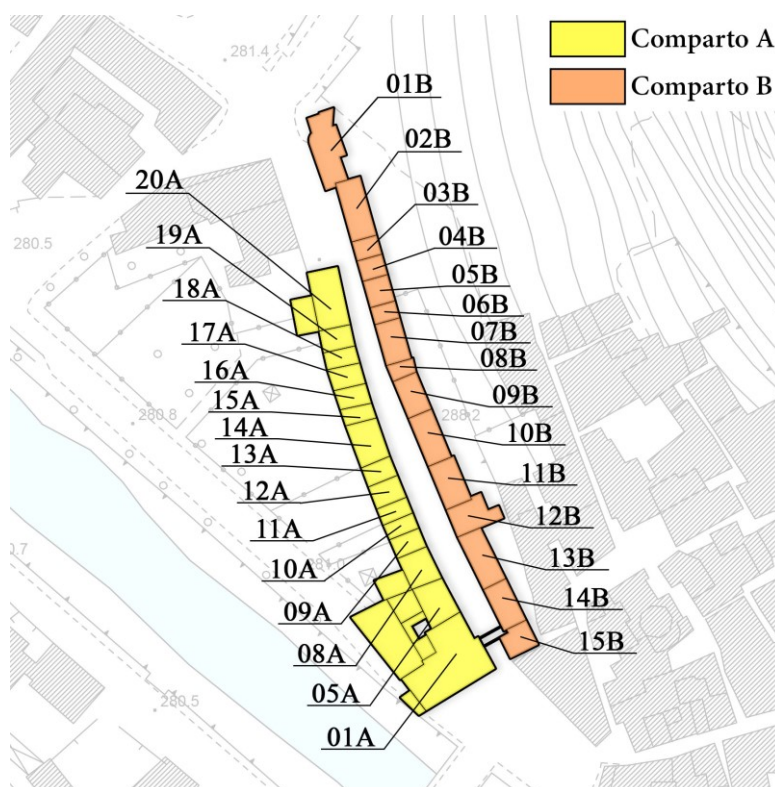


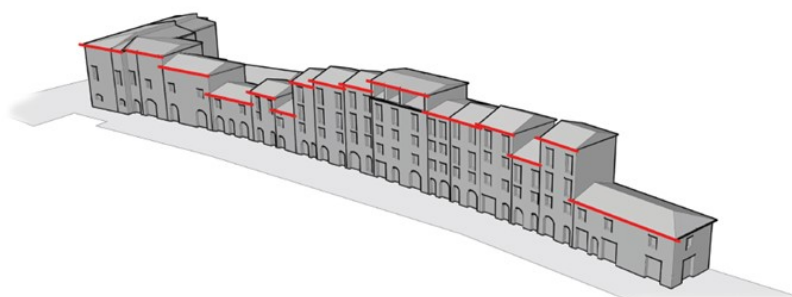
Figura 5-29 Individuazione delle US ed attribuzione del codice identificativo

Grazie all'utilizzo di mappe interattive on line (es. Bing Maps, Google Earth, etc.), alla consultazione di documentazione storica concessa dall'Ufficio Tecnico del Comune di Sora e ad un primo rilievo speditivo a vista è stato possibile osservare che

nonostante la totalità delle unità strutturali presenta struttura portante verticale in muratura, si osserva una vasta varietà di tipologie di orizzontamenti.

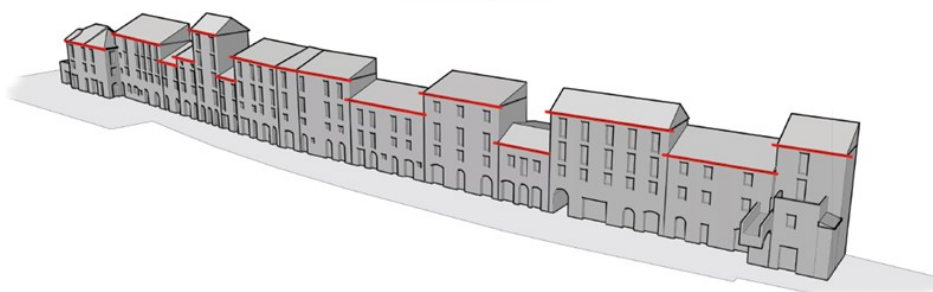
Una volta identificato l'aggregato strutturale, l'infrastruttura di interconnessione e le singole unità strutturali sono state rilevate le **altezze** delle singole unità e definiti i numeri di piani di ogni edificio. Si è proceduto infatti alla misura dell'altezza degli edifici attraverso una stima qualitativa per confronto con elementi come porte e finestre in facciata e mediante l'utilizzo del distanziometro laser misurando la distanza da terra all'imposta della quota di copertura dell'unità strutturale. I dati sono stati poi elaborati per ottenere la media delle altezze all'imposta di copertura che è risultata essere pari a 10,15 m. Il numero di piani è stato definito sia valutando il numero dei livelli di bucatore sulla facciata delle unità strutturali, sia considerando il numero di impalcati all'interno degli edifici desumibili dalle sezioni presenti sulle tavole dei rilievi post sisma di Borgo San Rocco. Si è osservato un numero di piani minimo tra tutte le unità strutturali pari a 1 e un numero di piani massimo tra tutti gli edifici pari a 5 (Figura 5-30)

COMPARTO A



COMPARTO A	UNITA' STRUTTURALE	01A	02A	03A	04A	05A	06A	07A	08A	09A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	17A	18A	19A	20A	21A	
	ALTEZZA COPERTURA [m]	11,5	11,5	3,5	8,0	9,7	3,5	2,5	6,4	8,4	6,4	11,9	13,0	13,5	15,0	12,5	12,5	12,9	9,9	13,5	6,6	3,3	
	N° PIANI	3	3	1	2	2	1	1	2	3	3	4	4	4	4	5	4	4	4	3	4	2	1

COMPARTO B



COMPARTO B	UNITA' STRUTTURALE	01B	02B	03B	04B	05B	06B	07B	08B	09B	10B	11B	12B	13B	14B	15B	16B
	ALTEZZA COPERTURA [m]	09,5	12,0	9,0	10,5	16,0	9,0	13,0	13,0	13,0	10,0	13,0	8,0	13,5	10,4	13,4	6,5
	N° PIANI	3	4	3	3	5	3	4	4	4	3	3	2	3	3	4	2

Figura 5-30 Borgo San Rocco: altezze

L'analisi ha previsto la valutazione della **superficie coperta** dell'aggregato strutturale. È stata ottenuta considerando l'impronta a terra della porzione edificata dell'aggregato strutturale, non considerando i corpi edilizi aggettanti quali balconi e avancorpi poiché non sono stati riscontrati elementi di questo tipo con dimensioni rilevanti. È stato così ottenuto un dato di superficie coperta per ogni unità strutturale desumibile dalla rappresentazione in pianta dell'aggregato. Sono state così sommate le aree delle singole unità componenti il Comparto A e il Comparto B e infine è stata definita la superficie coperta dell'aggregato strutturale totale pari a 2758 mq.

Contestualmente è stata misurata la **lunghezza del fronte** dell'aggregato strutturale sull'infrastruttura di connessione. Tale lunghezza è stata desunta sulla pianta dei singoli comparti e misurata come proiezione sull'infrastruttura, senza considerare i disallineamenti del fronte stesso. I dati ottenuti sono stati indicati in tabelle riassuntive che mostrano la lunghezza del fronte pari a 273,7 m (Figura 5-31).

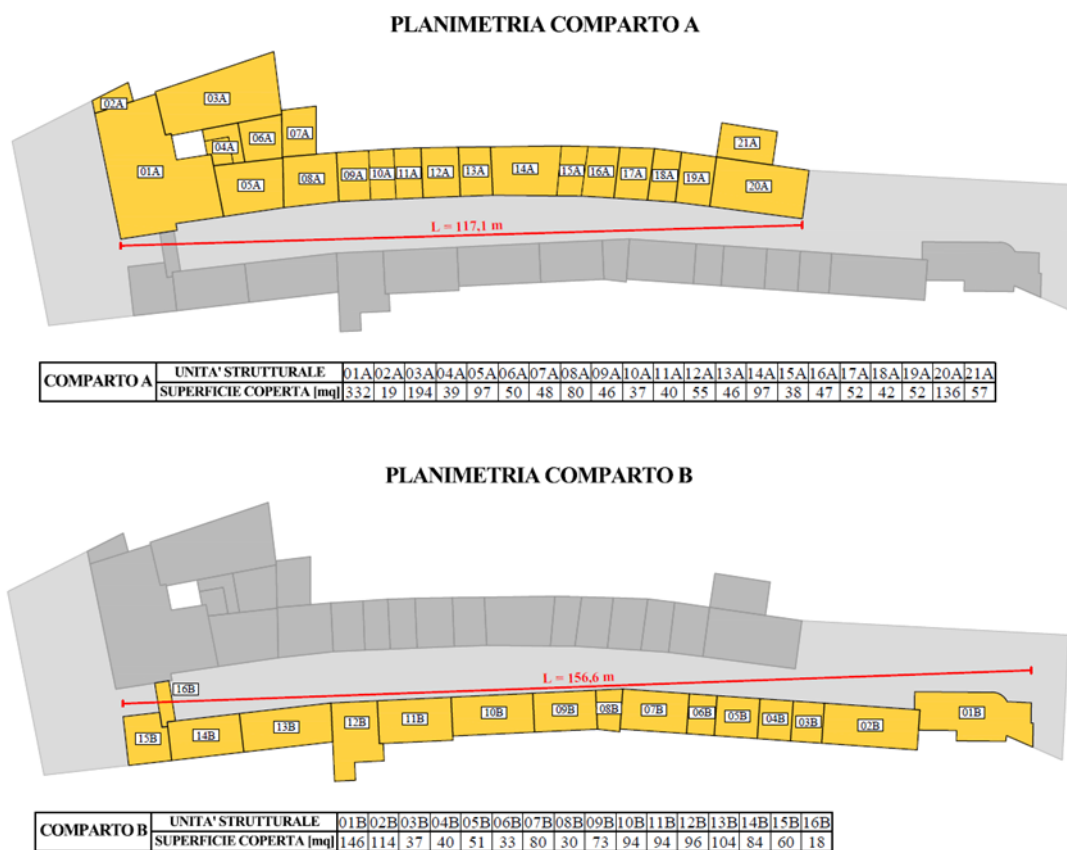


Figura 5-31 Borgo San Rocco: lunghezze del fronte

Per elementi di interconnessione si intende la presenza di volte o archi di interconnessione all'interno dell'aggregato strutturale.

Nel caso dell'aggregato di Borgo San Rocco è stato individuato un **arco di interconnessione** che mette in relazione il Comparto A e il Comparto B (Figura 5-32).



Figura 5-32 Arco di interconnessione

L'arco si trova a una estremità dell'aggregato strutturale. Si tratta di un arco policentrico a sesto ribassato poiché ha freccia pari a 1 m e luce di 4,7 m con sesto è pari a 0,42 Figura 5-33.

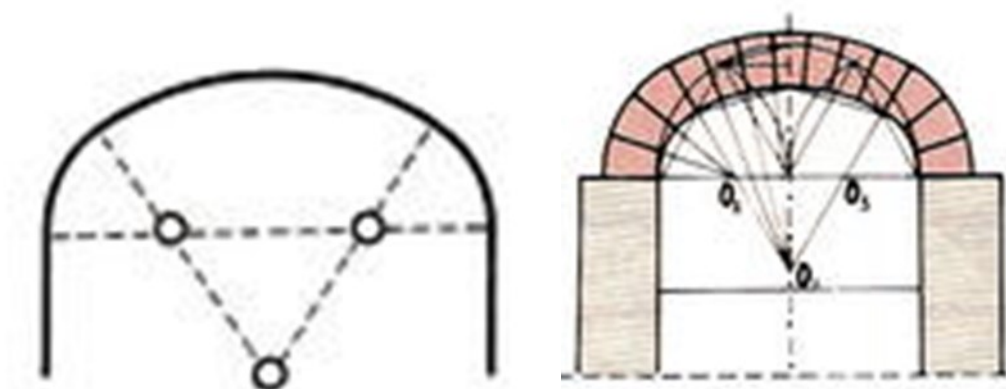
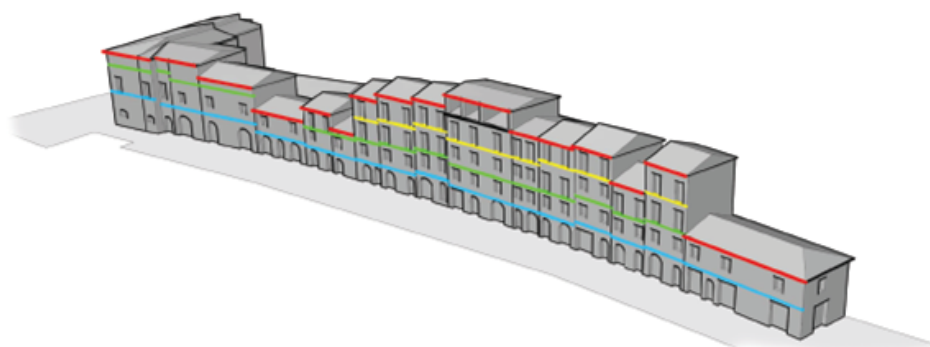


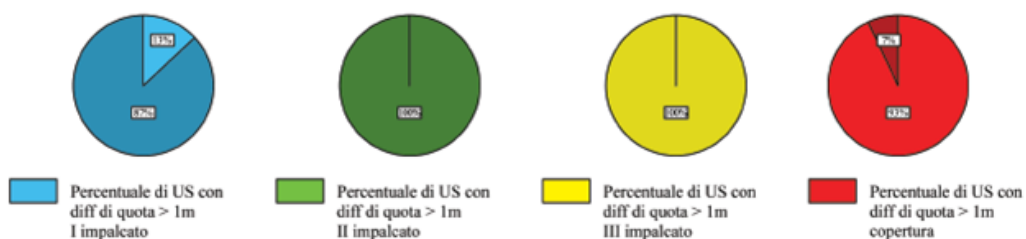
Figura 5-33 Schema di arco policentrico a sesto ribassato

L'analisi si sofferma sulla regolarità strutturale dell'aggregato strutturale. In particolare analizza la **regolarità di allineamento** tra le quote di imposta della copertura e la regolarità di allineamento delle quote degli orizzontamenti. Per disallineamento si intendono differenze tra le quote di imposta della copertura di unità strutturali adiacenti di entità maggiore a 1 m. Se riscontrata tale differenza in almeno il 30% delle unità strutturali l'aggregato presenta tale irregolarità strutturale. Per valutare la presenza di condizioni di irregolarità morfologica e strutturale, che rappresentano una maggiore vulnerabilità complessiva dell'aggregato, sono state analizzate le sezioni disponibili tra i documenti di archivio e verificando visivamente le differenze di quota tra le bucatore. È stata poi sviluppata una tabella per ogni comparto che individua la percentuale di unità strutturali che presenta tali condizioni (Figura 5-34).

COMPARTO A



ID	Altezza interpiano I	Quota impalcato I	Diff quota impalcato I	Altezza interpiano II	Quota impalcato II	Diff quota impalcato II	Altezza interpiano III	Quota impalcato III	Diff quota impalcato III	Quota copertura	Diff quota copertura
01A	4,30	4,30	0,00	4,20	8,50	0,00	-	-	-	11,50	1,80
05A	4,30	4,30	1,20	4,20	8,50	0,00	-	-	-	9,70	3,30
08A	3,10	3,10	1,20	-	-	-	-	-	-	6,40	3,30
09A	2,80	2,80	0,30	2,80	5,60	0,00	-	-	-	8,40	2,00
10A	2,80	2,80	0,10	2,80	5,60	0,30	-	-	-	6,40	5,50
11A	2,90	2,90	0,10	3,00	5,90	0,30	3,00	8,90	0,50	11,90	5,50
12A	3,00	3,00	0,50	3,20	6,20	0,50	3,20	9,40	0,70	13,00	1,10
13A	3,50	3,50	0,50	3,20	6,70	0,80	3,40	10,10	0,90	13,50	1,50
14A	3,00	3,00	0,50	2,90	5,90	0,80	3,30	9,20	0,90	15,00	2,50
15A	3,00	3,00	0,00	2,90	5,90	0,10	3,30	9,20	0,60	12,50	2,50
16A	3,00	3,00	0,50	3,00	6,00	0,80	3,80	9,80	0,60	12,50	0,40
17A	3,50	3,50	0,50	3,30	6,80	0,80	3,10	9,90	0,10	12,90	3,00
18A	3,20	3,20	0,30	3,10	6,30	0,50	-	-	-	9,90	3,60
19A	3,40	3,40	0,20	3,30	6,70	0,40	3,30	10,00	-	13,50	6,90
20A	3,30	3,30	0,10	-	-	-	-	-	-	6,60	6,90



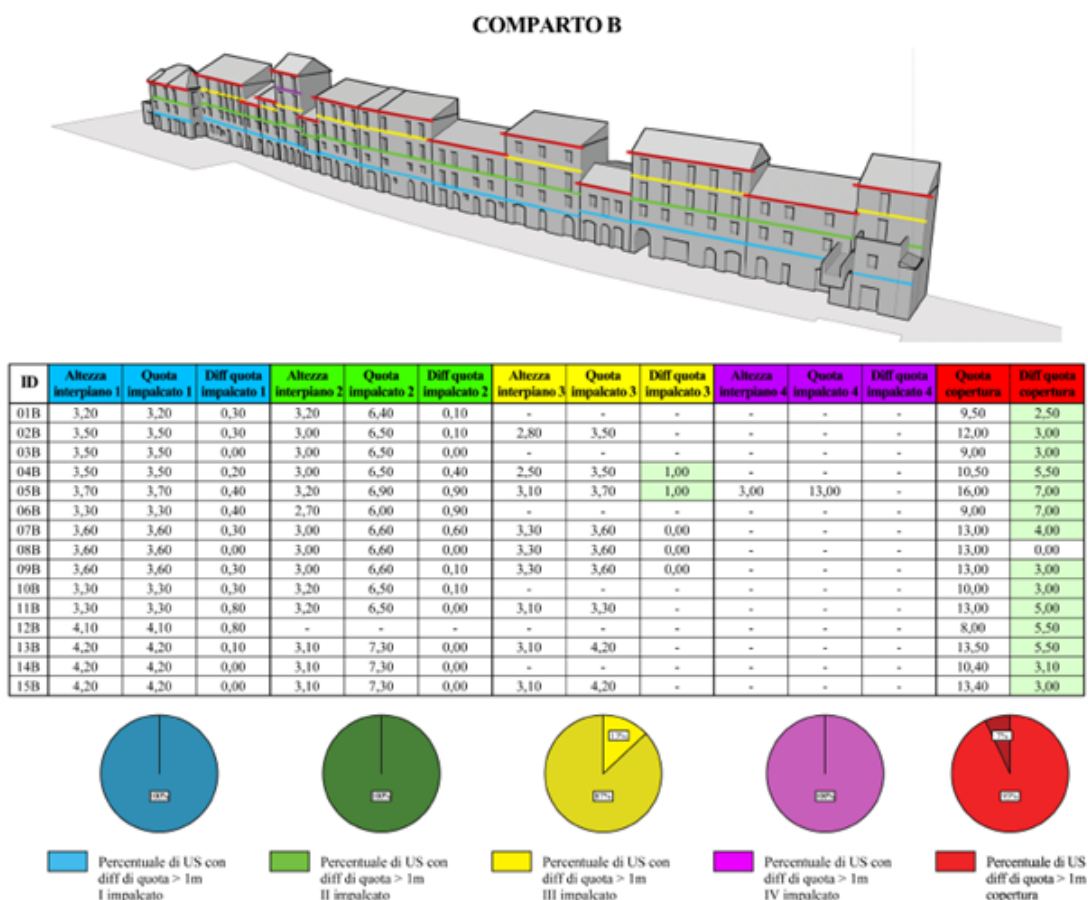


Figura 5-34 Borgo San Rocco: regolarità degli orizzontamenti

L'analisi ha previsto la valutazione del **sistema di bucature**. Tale valutazione è riferita al sistema di aperture (porte, finestre, nicchie per impianti) delle pareti esterne dell'aggregato strutturale e in modo particolare alle unità strutturali in muratura.

La valutazione è stata effettuata per ogni singola unità strutturale. Si definisce "incongruo" quando il sistema di bucature è caratterizzato da almeno una delle seguenti anomalie:

- presenza di aperture, anche ad un solo piano dell'US, particolarmente ampie (> 4 mq);
- presenza di un diffuso sistema di aperture con forti disallineamenti in verticale o in orizzontale, che compromettono, rispettivamente, la continuità dei maschi murari o delle fasce di interpiano;
- presenza di allineamenti di bucature in prossimità dei setti perpendicolari alla facciata.

Se una o più delle seguenti condizioni si riscontra per più del 30% delle unità strutturali, il sistema di bucatore dell'aggregato strutturale si definisce incongruo.

Nell'aggregato strutturale di Borgo San Rocco tale condizione è stata riscontrata per l'80% delle unità strutturali. In particolar modo il piano terra è caratterizzato da aperture molto ampie e diffuse e costituiscono un elemento di vulnerabilità dell'aggregato.

Inoltre si osservano allineamenti molto accentuati in direzione verticale delle bucatore per ogni singola unità strutturale e ciò comporta una vulnerabilità dell'edificio in quanto il possibile meccanismo di rottura può prevedere il distacco delle fasce murarie comprese tra le bucatore (Figura 5-35).

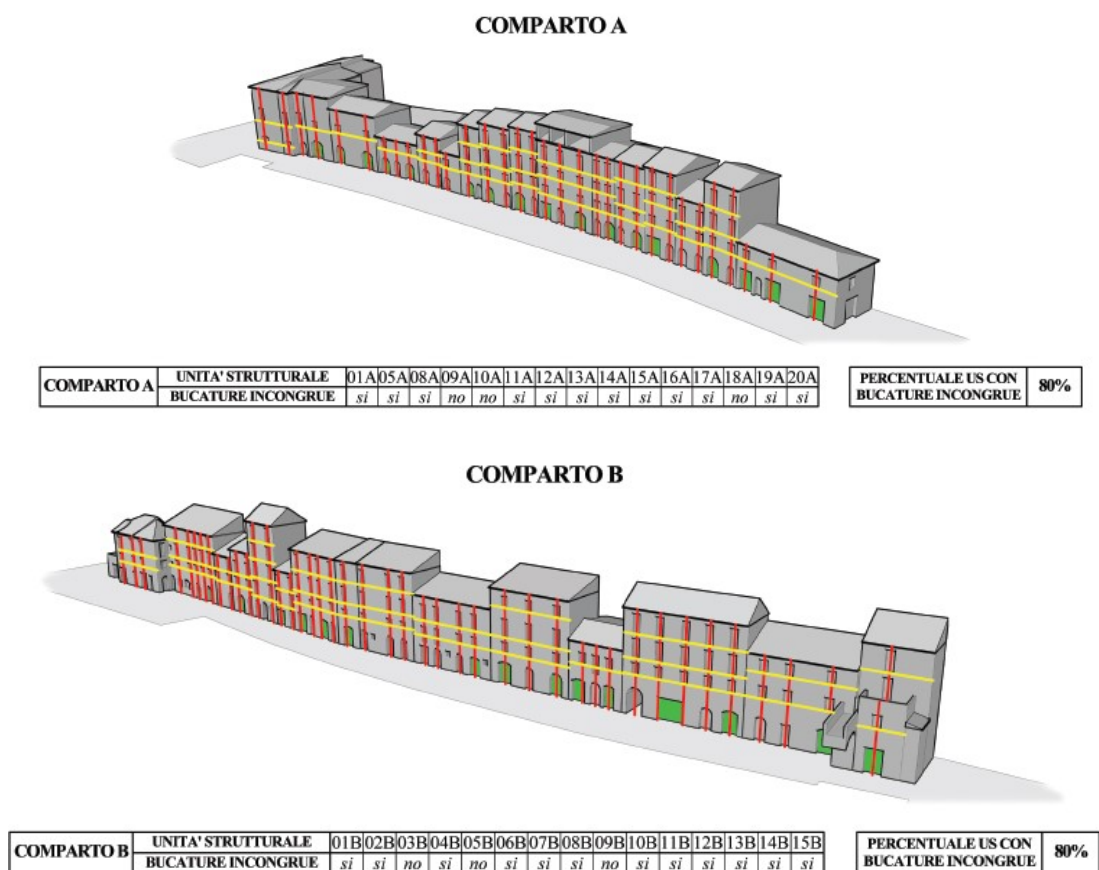


Figura 5-35 Borgo San Rocco: sistema di bucatore

La presenza di presidi di **rinforzo** quali catene o tiranti, facilmente individuabili anche dall'esterno dalla posizione dei capichiave, rappresenta una informazione indispensabile per l'analisi dell'aggregato strutturale, in particolare delle singole unità strutturali. Nel caso particolare dell'aggregato di Borgo San Rocco le catene e i tiranti

presenti sono stati facilmente individuati poiché i capichiave sono fortemente visibili dall'esterno, come si può notare nelle foto seguenti Figura 5-36.



Figura 5-36 Borgo San Rocco: rinforzi strutturali

Dal rilievo effettuato si è riscontrato un diffuso sistema di catene negli edifici del Comparto A e un sistema di catene per un solo edificio del Comparto B.

L'analisi necessita la definizione delle caratteristiche qualitative delle **strutture verticali e delle murature**. È stato possibile indicare la tipologia di struttura verticale attraverso una classificazione della muratura di tipo sintetico riconducendo l'apparecchio murario a tre macro-classi: regolari, sbazzate ed irregolare in base alla tessitura.

L'analisi di un campione di 1 m² di muratura non intonacata di Borgo San Rocco ha fatto emergere che si tratta di una muratura costituita da pietrame disordinario che da una indagine visiva risulta essere costituita da pietre di origine calcarea, probabilmente proveniente dal vicino corso fluviale, con malta di qualità scadenti poiché facilmente frantumabile al tatto.

Per facilitare l'indagine sono state realizzate due griglie regolari in cui sono stati evidenziati i pieni e i vuoti costituenti la muratura: in particolare in bianco sono indicate le pietre e in grigio è indicata la malta. Sono state quindi indicate le aree, espresse in mm², rispettivamente di pietre e malta, la loro percentuale complessiva e il loro rapporto. Da quest'ultimo si deduce che la qualità muraria, avendo un basso rapporto malta/cemento, è considerata scadente.

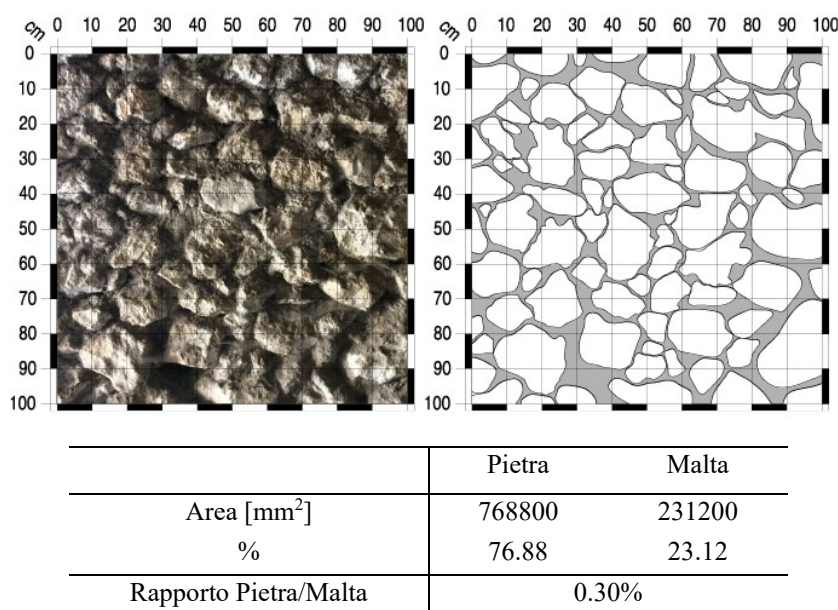


Figura 5-37 Borgo San Rocco: strutture verticali

La definizione delle tipologie di **orizzontamenti** è stata effettuata attraverso la consultazione dei rilievi post sisma già citati ed attraverso l'ispezione visiva degli ambienti interni del Borgo. È necessario individuare la tipologia di struttura orizzontale in base al materiale di cui sono composti e definire l'orditura dei solai per la conoscenza e l'analisi degli edifici. Nel caso di studio sono state riscontrate numerose tipologie di orizzontamenti. Tale circostanza è osservabile dalle tavole in sezione dell'aggregato strutturale dove è possibile notare l'eterogeneità delle tipologie di impalcati. Si osservano solai in laterocemento, solai in legno, solai realizzati con putrelle e tavelloni e numerose volte presenti principalmente nei piani inferiori (Figura 5-38).

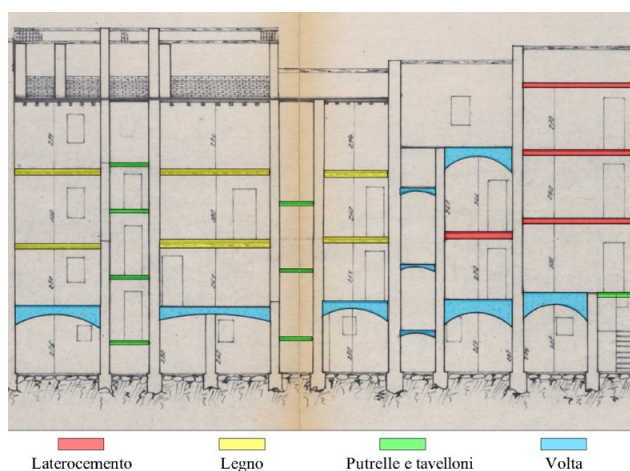


Figura 5-38 Sistema di orizzontamenti eterogeneo

Per quanto riguarda la copertura del Borgo la totalità delle unità strutturali ha struttura a capriata lignea, con semplice orditura a falsi puntoni sormontati da un tavolato che fa da base per il manto di copertura in coppi. Le conformazioni per le due cortine sono differenti, cioè alle estremità del borgo gli edifici hanno un tetto a padiglione mentre nella zona centrale presentano tetto a capanna.

A seconda dell'esperienza di chi effettua il rilievo è possibile identificare visivamente anche altri **dettagli strutturali** che determinano il comportamento della struttura. Nel caso di Borgo San Rocco l'attenzione è stata posta al rilievo e conoscenza di numerosi dettagli di tipo strutturale che solitamente costituiscono elementi di vulnerabilità per le murature. Dapprima sono state verificate le condizioni di ammorsamento tra pareti ortogonali. Con questa voce si valuta il grado di organizzazione degli elementi verticali: l'elemento significativo è la presenza e l'efficacia dei collegamenti fra pareti ortogonali, tali da assicurare l'efficienza del comportamento scatolare della struttura. Per valutare il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali occorre indagare la qualità e la fattura dei cantonali, verificando che le dimensioni degli elementi di pietra, disposti alternati lungo l'altezza della parete, siano tali da interessare tutto lo spessore murario e non solo una sua parte. Importanti elementi di cui verificare la presenza sono i cordoli e elementi di rinforzo per il collegamento tra la muratura e la copertura e tra la muratura e i solai intermedi. Spesso sono visibili dall'esterno poiché costituiti da un materiale differente dalla muratura (molto spesso sono in c.a.) e realizzati con interventi postumi alla costruzione dell'edificio. Identificate le condizioni di ammorsamento sia verticali che orizzontali è stato necessario indicare la presenza di singolarità visibili in facciata che possono essere così elencate:

- Riduzioni localizzate delle sezioni murarie (presenza di canne fumarie, cavedi, nicchie, etc.);
- Discontinuità localizzate (chiusura di vecchie aperture, sarciture a scuci e cucì mal realizzate, etc.);
- Presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura;
- Sopraelevazioni in muratura su muratura esistente;
- Elevata percentuale di aperture di vani al piano terra;
- Presenza di piccoli corpi aggiunti di differente rigidità con collegamenti localizzati;
- Presenza del timpano in facciata.

5.2.5 Elaborazione grafica CAD

Una volta conclusa la fase del rilievo è stata effettuata una revisione critica dei dati raccolti. Per facilitare tale operazione è stato realizzato un modello 3D mediante il software Autodesk Autocad utilizzando come cartografia di base le tavole compilate a seguito del terremoto del 7 e 11 maggio del 1984, relative al “rilievo e progetto di interventi di riattazione e adeguamento igienico-funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 di Borgo San Rocco” costituite da piante, sezioni e prospetti in scala 1:100 e le informazioni desunte dal rilievo realizzato (Figura 5-39) (Figura 5-40).

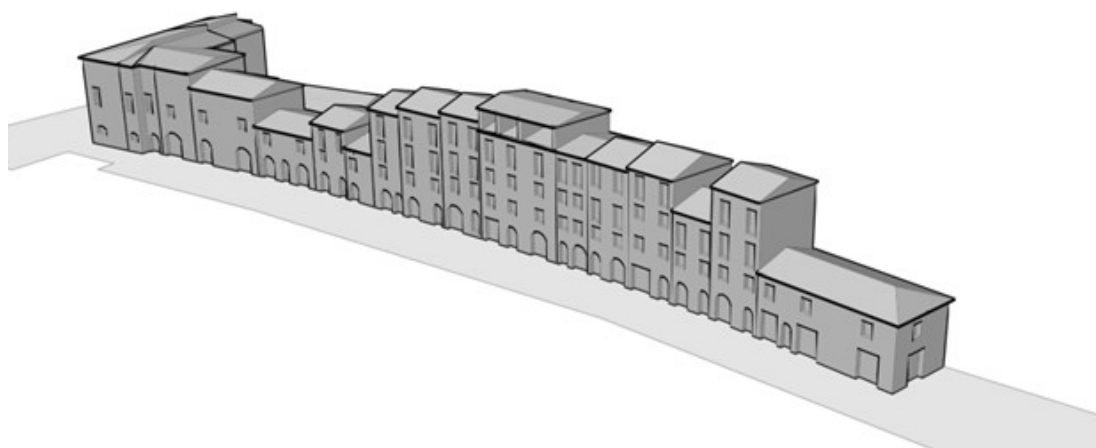


Figura 5-39 Modello 3D del Comparto A



Figura 5-40 Modello 3D del Comparto B

5.2.6 Analisi strutturale (Algoritmo Saccucci-Grande)

Seguendo la metodologia Saccucci-Grande proposta nel capitolo precedente, l'algoritmo per la determinazione dei possibili meccanismi di collasso implementato nel foglio di calcolo è stato applicato al caso di studio di Borgo San Rocco. Per ogni unità strutturale è stata riempita una scheda di valutazione, basata sulla documentazione a disposizione e sui dati di rilievo raccolti.

Di seguito è riportata una scheda esemplificativa per l'US 05° (Figura 5-41).

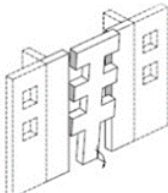
SCHEDE DI VALUTAZIONE DEL MECCANISMO DI COLLASSO PER EDIFICI IN MURATURA		05A	5 CARATTERISTICHE STRUTTURALI		
1 INFORMAZIONI GENERALI			1 N° impalcati con strutture a volta		
1 Regione	Lazio		2 Tipologia solaio		
2 Provincia	Frosinone		impalcato 1	laterocemento	
3 Città	Sora		impalcato 2	impalcato 6	
4 Indirizzo	Borgo San Rocco		impalcato 3	impalcato 7	
5 Aggregato Strutturale	0000000AB		impalcato 4	impalcato 8	
6 Unità strutturale	05A		impalcato 5	impalcato 9	
7 Destinazione d'uso	Abitazione			impalcato 10	
8 Data di rilievo	mercoledì 15 giugno 2016		3 Orditura solaio rispetto alla facciata		
9 Rilevatore	Marco Saccucci		impalcato 1	Parallelo	impalcato 6
2 DATI SUL TESSUTO URBANO			impalcato 2	impalcato 7	
1 N° di US nell'AS	37		impalcato 3	impalcato 8	
2 Posizione dell'US rispetto all'AS	Interna		impalcato 4	impalcato 9	
3 Connessione con pareti adiacenti	Si		impalcato 5	impalcato 10	
3 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA FACCIATA			4 Tipologia tetto		
1 Orientamento della facciata	Sud-Est		5 Orditura del tetto	Parallelo alla facciata	doppia falda
2 Numero di piani dell'edificio	2		6 Tipo di muratura	Pietrame disordinata	
3 Numero di piani della facciata	2		7 Catene	No	No
4 Lunghezza facciata [m]	10,50		impalcato 1	impalcato 6	
5 Altezza totale facciata [m]	9,70		impalcato 2	impalcato 7	
6 Presenza in parete del timpano	No		impalcato 3	impalcato 8	
7 Altezza timpano (se presente)	0,00		impalcato 4	impalcato 9	
8 Snellezza	13,85714286		impalcato 5	impalcato 10	
4 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLE BUCATURE			8 Ammorsamento impalcato		
1 Numero di bucaure per piano			impalcato 1	No	impalcato 6
	3 piano 6		impalcato 2	impalcato 7	
	2 piano 7		impalcato 3	impalcato 8	
	piano 8		impalcato 4	impalcato 9	
	piano 9		impalcato 5	impalcato 10	
	piano 10		9 Cordolo in sommità		
2 Stima dimensioni aperture [m]			No		
base		1,20	6 MECCANISMO DI COLLASSO		
altezza		1,50	1 Possibile meccanismo di collasso		
3 Altezza fascia orizzontale superiore [m]		0,60	D		
4 Bucature allineate verticalmente	Si				
5 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PIANI A					
1 Spessore muro inferiore della facciata [m]		0,70			
2 Spessore muro superiore (%)		80%			
3 N° pareti portanti interne perp. alla facciata		1			
4 Luce tra le pareti perp. alla facciata		10,50			
5 Discontinuità sezioni murarie	Si		7 INTERFERENZA		
6 Ammorsamento pareti perpendicolari alla facciata	Si		1 Lunghezza ingombro al suolo [m]		
			9,70		

Figura 5-41 Foglio Excel® per la definizione dei meccanismi di collasso

L'algoritmo, in base ai dati inseriti nelle varie sezioni della scheda di valutazione del meccanismo di collasso per edifici in muratura, ha elaborato le criticità riscontrate.

A seconda delle caratteristiche strutturali il foglio di calcolo individua o meno la presenza di:

- 1) snellezza
- 2) ammorsamento degli interpiani
- 3) cordolo in sommità
- 4) ammorsamento delle pareti perpendicolari alla facciata

- 5) catene e tiranti
- 6) bucatore allineate
- 7) discontinuità delle sezioni murarie
- 8) luce elevata tra le pareti perpendicolari alla facciata
- 9) presenza del timpano in facciata

In particolare identifica un valore vero se la criticità si verifica, ed identifica invece un valore falso se la criticità non si verifica.

Individuate quindi le criticità che si riscontrano nell'edificio in muratura analizzato, l'algoritmo è in grado di definire il meccanismo di collasso che ha maggiore probabilità di verificarsi in caso di evento sismico, facendo un confronto con le carenze strutturali che caratterizzano un particolare cinematismo di crollo.

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati ottenuti ed è indicato, per ogni unità strutturale, il più probabile cinematismo di collasso (Tabella 5-1):

Tabella 5-1 Esiti dei risultati

COMPARTO A		COMPARTO B	
ID	MECCANISMO DI COLLASSO INDIVIDUATO	ID	MECCANISMO DI COLLASSO INDIVIDUATO
01A	Flessione orizzontale	01B	Ribaltamento lungo le aperture
05A	Ribaltamento lungo le aperture	02B	Ribaltamento semplice parziale
08A	Ribaltamento lungo le aperture	03B	Ribaltamento semplice parziale
09A	Ribaltamento lungo le aperture	04B	Ribaltamento semplice parziale
10A	Ribaltamento semplice parziale	05B	Ribaltamento semplice globale
11A	Ribaltamento semplice parziale	06B	Ribaltamento lungo le aperture
12A	Flessione orizzontale	07B	Ribaltamento semplice parziale
13A	Flessione orizzontale	08B	Ribaltamento semplice parziale
14A	Flessione orizzontale	09B	Ribaltamento semplice parziale
15A	Ribaltamento semplice parziale	10B	Ribaltamento semplice globale
16A	Ribaltamento lungo le aperture	11B	Ribaltamento semplice parziale
17A	Ribaltamento semplice parziale	12B	Ribaltamento semplice parziale
18A	Flessione orizzontale	13B	Flessione orizzontale
19A	Ribaltamento semplice parziale	14B	Ribaltamento lungo le aperture
20A	Flessione orizzontale	15B	Ribaltamento semplice globale

5.2.7 Visualizzazione dei risultati

Associando i risultati ad un modello grafico 3D appositamente realizzato è possibile visualizzare le tipologie di meccanismo di collasso che interessano gli aggregati avendo una chiara indicazione qualitativa sulla vulnerabilità a cui sono soggetti.

La colorazione delle facciate in base al tipo di meccanismo avviene in maniera manuale e la rappresentazione risulta essere statica. La visualizzazione costituisce uno strumento immediato e facilmente interpretabile per attuare quegli interventi, economici e tecnici, per ridurre la vulnerabilità degli edifici (Figura 5-42).

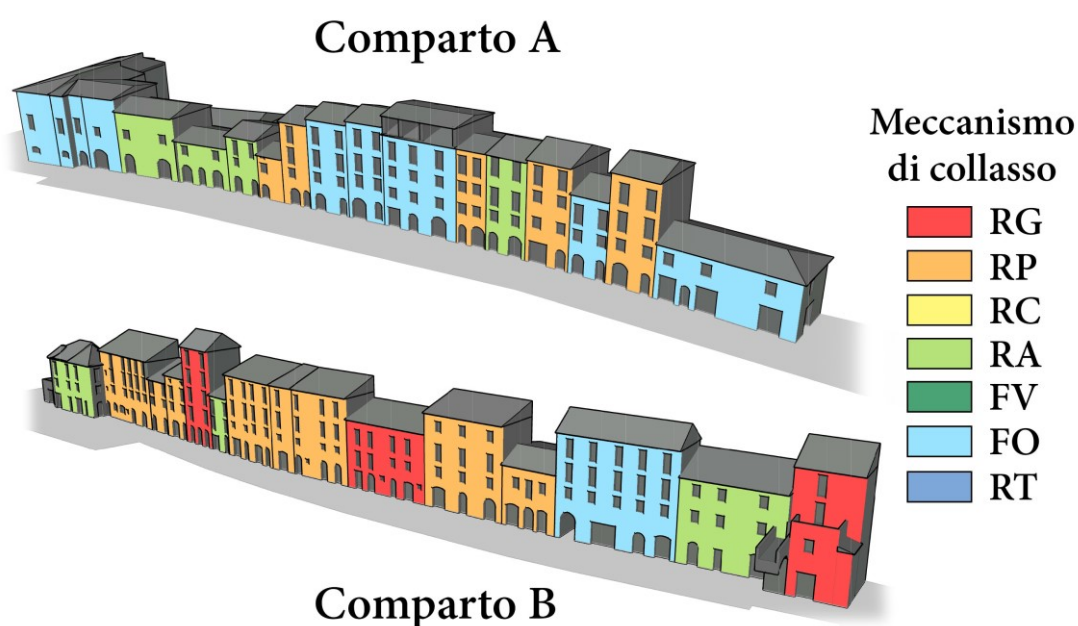


Figura 5-42 Approccio qualitativo – Meccanismi individuati per le US, in cui si è indicato con: RG il meccanismo di ribaltamento semplice globale, RP il meccanismo di ribaltamento semplice parziale, RC il meccanismo di ribaltamento del cantonale, RA il meccanismo di ribaltamento lungo le aperture, FV il meccanismo di flessione verticale, FO il meccanismo di flessione orizzontale e RT il meccanismo di ribaltamento del timpano

Si osserva che per quanto riguarda il Comparto A la maggior parte degli edifici presenta un meccanismo di ribaltamento parziale della facciata e di flessione orizzontale, mentre per il Comparto B si attivano dei meccanismi di ribaltamento globale oltre ai meccanismi di ribaltamento parziale e flessione orizzontale. Non essendoci presenza di timpani in facciata non si riscontrano meccanismi di ribaltamento dello stesso.

5.3 Analisi quantitativa di secondo livello

5.3.1 Il rilievo strumentale

Secondo la metodologia indicata nel precedente capitolo, per eseguire l'analisi di secondo livello è opportuno eseguire un rilievo di maggior dettaglio degli edifici. In tale contesto è stata utilizzata la tecnica della fotogrammetria digitale aerea per l'esecuzione del rilievo geometrico.

Il modello grafico 3D del caso di studio è stato ottenuto grazie ad una elaborazione fotogrammetrica digitale di fotogrammi acquisiti con drone: in particolare, è stato utilizzato il drone DJI Phantom 3 Advanced con camera da 12 Mpixels (4000 x 3000) montata su gimbal a 3 assi in grado di geolocalizzare attraverso il GPS ogni singolo frame scattato (Figura 5-43).



Figura 5-43 Drone professionale DJI Phantom 3 Advanced

Per ottenere la nuvola di punti, risultato della fotogrammetria digitale, con una buona risoluzione (inferiore a 5 cm/pixel) e una adeguata scala di rappresentazione nominale, la quota di volo è stata fissata a 70mt. Mantenendo costante la velocità del drone, sono state realizzate delle strisciate fotografiche secondo la direzione longitudinale e trasversale, sulla base di una doppia griglia regolare (Figura 5-44.). Durante la presa, è stata posta particolare attenzione alla sovrapposizione raccomandata tra due fotogrammi consecutivi: almeno il 70-75% longitudinalmente alla direzione di volo [overlap] e almeno il 50-60% tra due strisciate contigue [overside].

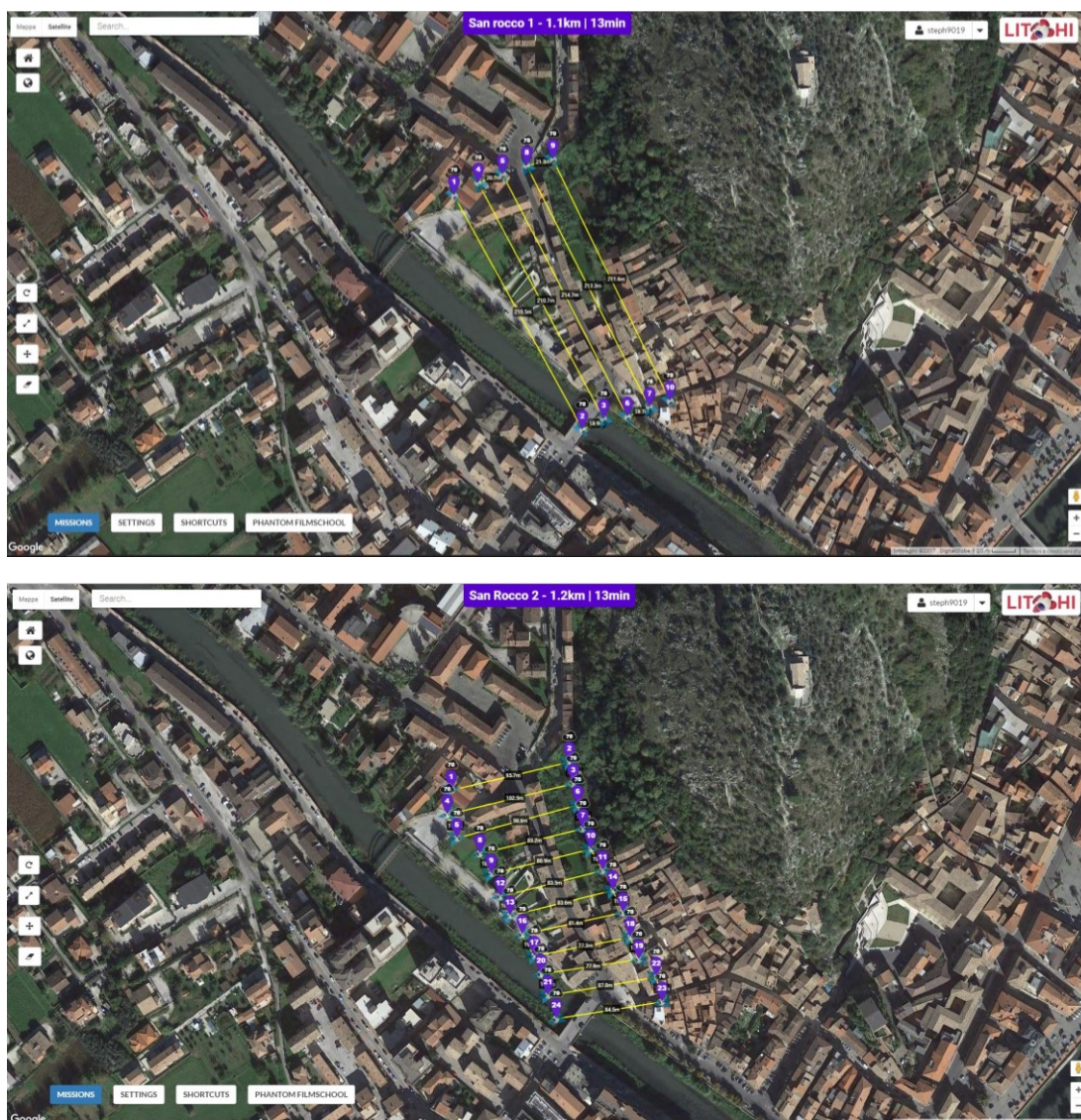


Figura 5-44 Direzione delle strisciate fotografiche eseguite da drone

I fotogrammi sono stati eseguiti con una temporizzazione stabilita [timelaps] e i parametri di rilievo (waypoints) sono stati impostati in fase di pianificazione del volo nel software di gestione del drone (Flylitchi©). La durata complessiva delle missioni di volo è stata di un'ora e sono state catturate circa 1600 immagini del borgo.

Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito con buone condizioni meteo ed illuminazione solare durante le ore mattutine per ridurre al minimo la generazione di ombre, elemento di disturbo per l'esecuzione del processo di generazione della nuvola di punti. Dopo avere verificato la corretta inquadratura, qualità ed esposizione delle immagini acquisite, con l'uso del software Agisoft PhotoScan© è stato creato un modello geometrico 3D, come nuvola di punti, con una buona approssimazione

metrica: l'errore rilevato sulla base del confronto con i dati del rilievo diretto è stato dell'1% (Figura 5-45).



Figura 5-45 Borgo San Rocco. Visualizzazione ed edit della nuvola di punti

La gestione della nuvola di punti così ottenuta all'interno di software di modellazione grafica richiede necessariamente una pre-elaborazione all'interno di ulteriori software, pensati proprio per favorire l'importazione, la visualizzazione e l'editing di tali oggetti (es. Autodesk ReCap©): il software legge, infatti, la nuvola di punti come un file di testo contenente le coordinate spaziali (XYZ) e le informazioni RGB di ogni punto della nuvola (11,591,271 points) (Tabella 5-2).

Tabella 5-2 Estratto del file di testo .txt della nuvola di punti

X	Y	Z	R	G	B
-99.283212	44.201378	256.916451	159	154	149
-99.600134	45.237623	256.953126	149	143	139
-99.509197	44.126778	256.123456	160	154	147
-99.362487	44.012359	256.123547	159	154	148
-99.548255	45.106689	257.220176	162	156	139
-99.459789	44.489549	256.127863	148	144	118
-99.453548	44.449875	256.157549	135	133	139
-99.563668	45.198745	257.012645	80	78	62
...

Con un applicativo interno a ReCap© (Auto-Clean up) è stato possibile anche ridurre il rumore con l'eliminazione automatica, ad esempio, di quei punti che presentano l'incertezza di posizionamento, aumentando in tal modo la precisione del modello.

Ultimata l'ottimizzazione della nuvola di punti, è stato possibile verificare l'affidabilità della restituzione grafica grazie ad una serie di tool interni allo stesso software: in particolare, con gli strumenti di navigazione ed interrogazione si possono misurare le distanze, definire l'ortogonalità dei piani nel modello e individuare valori dell'elevazione suddividendole in fasce omogenee (Figura 5-46).

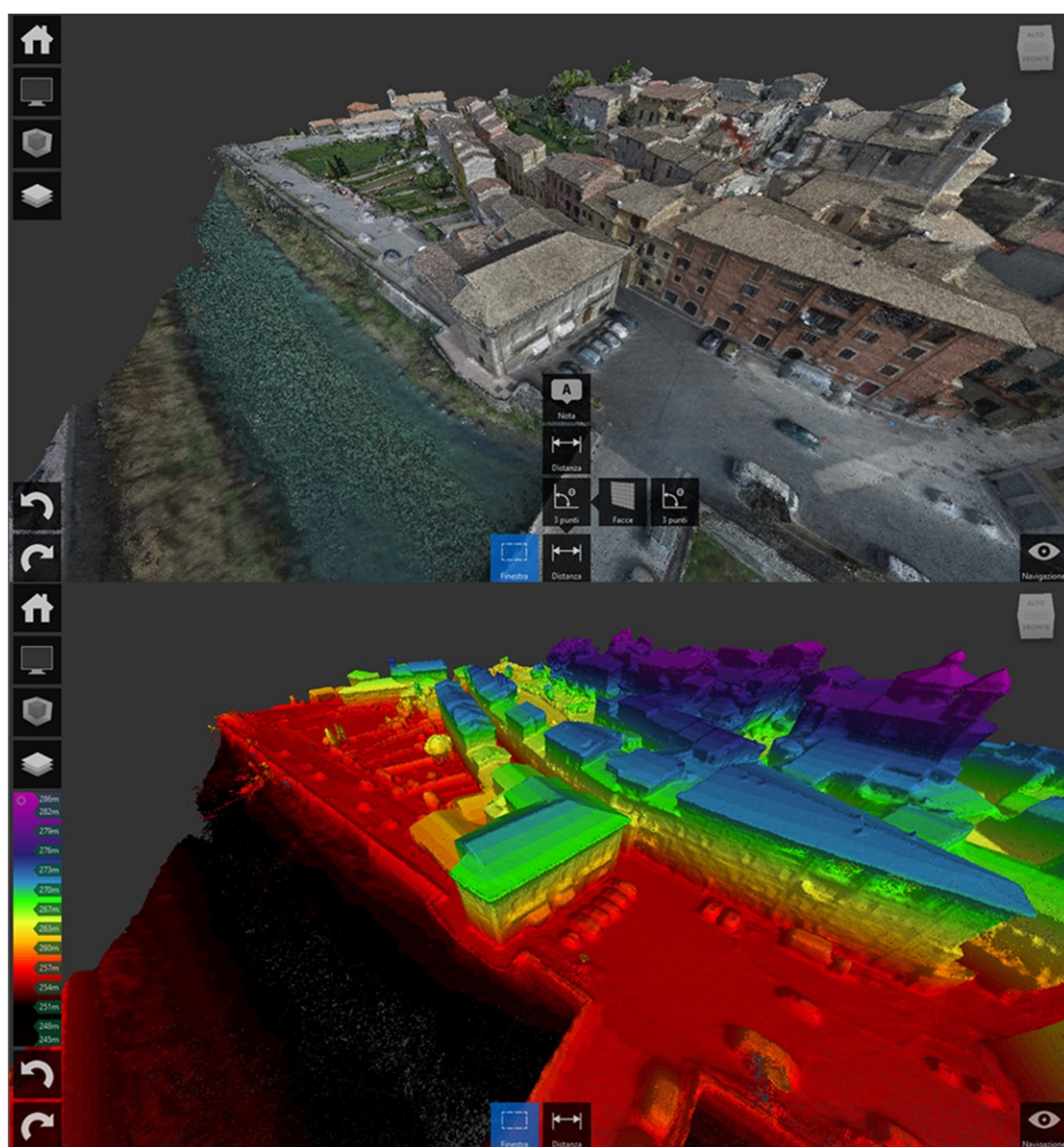


Figura 5-46 Borgo S. Rocco. Navigazione ed interrogazione della nuvola di punti all'interno del software Recap: a) analisi dell'ortogonalità dei piani; b) individuazione delle fasce di elevazione.

La costruzione di un modello parametrico di dettaglio richiede l'importazione della nuvola in un software di modellazione grafico/numerica, come ad esempio Autodesk Revit, e la geometrizzazione dei singoli componenti architettonici a cui associare una banca di dati del rilievo diretto (documentario, metrico, materico, del danno etc.) e, dove necessario, strumentale (termocamere).

5.3.2 Elaborazione grafico/numerica BIM

La progettazione del modello parametrico 3D del caso di studio, ottenuto con il software Autodesk Revit, si basa sulla nuvola di punti acquisita con il rilievo digitale fotogrammetrico. Ciò ha consentito una significativa rapidità nella fase della modellazione di volumi semplificati, molto importante quando l'oggetto di studio è particolarmente grande e complesso. Il file della nuvola, con estensione (.rcp) è stato poi importato nel sistema BIM e georeferenziato. Il software legge l'insieme dei punti della nuvola come snap e individua automaticamente le direzioni prevalenti (quelle su cui converge la maggior parte dei punti), ossia il contorno degli oggetti rilevati (esterno dell'aggregato) (Figura 5-47).



Figura 5-47 Integrazione del modello parametrico 3D alla nuvola di punti del rilievo fotogrammetrico digitale

Verificata la correttezza metrica e l'esatta collocazione geografica, sono stati individuati i livelli dei vari piani di ogni singolo edificio (compreso quello di gronda e di colmo delle coperture a falda che caratterizzano il borgo) prendendo come riferimento all'interno della nuvola il sistema di bucatore (finestre e porte) e confrontato con i dati del rilievo diretto (Figura 5-48).

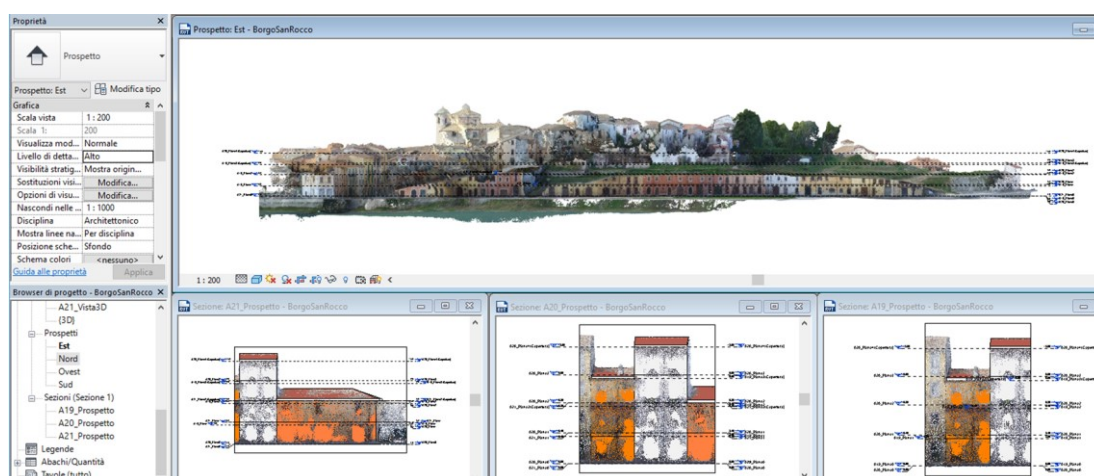


Figura 5-48 Individuazione dei livelli all'interno della nuvola di punti per la costruzione del modello parametrico 3D

Il passaggio dal modello volumetrico generale alla modellazione parametrica 3D di dettaglio ha richiesto la progettazione BIM delle singole unità strutturali. In particolare, con i dati di rilievo documentario (rilievi del post terremoto 1984) e diretto eseguiti nell'approccio di primo livello integrati con le informazioni ricavate dalla fotogrammetria digitale, sono stati modellati i componenti strutturali ed architettonici con le caratteristiche, geometriche e materiche e funzionali di cui si compongono.

È stato necessario modellare le volte e le varie tipologie di orizzontamenti presenti ed infine le strutture di copertura. Per ognuno dei seguenti elementi è stato possibile scegliere il materiale costituente da librerie di materiali interne al software e creando librerie custom. Anche gli elementi decorativi sono stati modellati attraverso la realizzazione di famiglie (.rfa) personalizzate. Così facendo si è ottenuto un modello parametrico delle unità strutturali rispettando gli standard di modellazioni delle UNI 11337 - LOD400/500 AS BUILT (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata., 51, 52).



Figura 5-49 Modello parametrico di dettaglio delle unità strutturali realizzato con Autodesk Revit

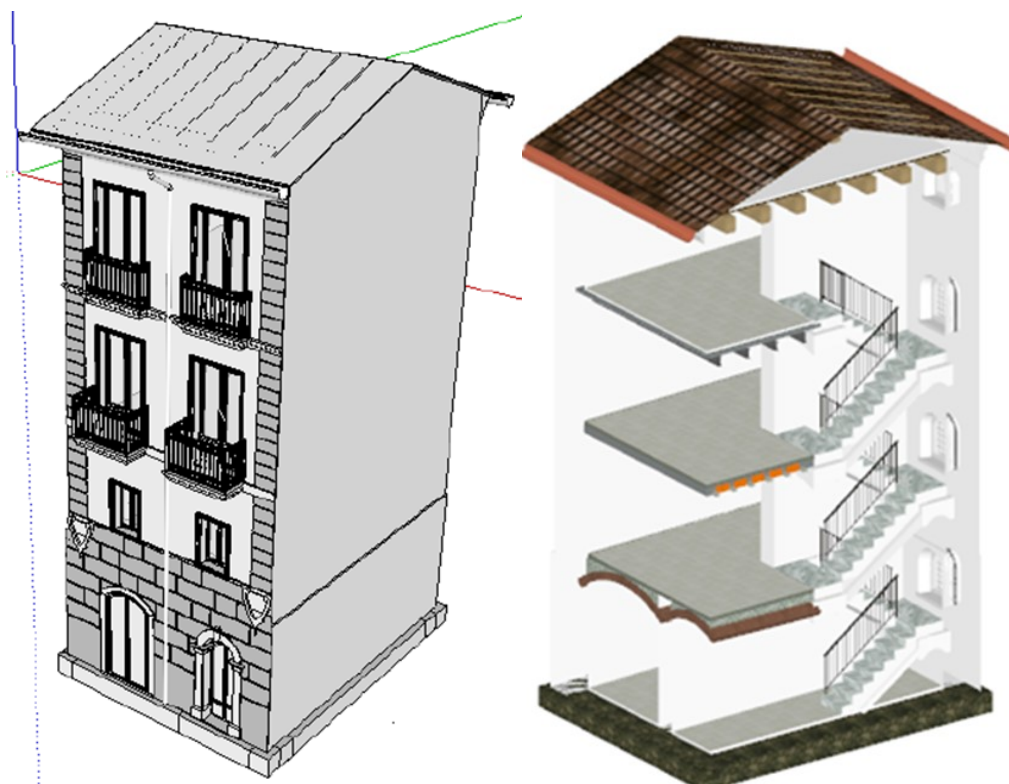


Figura 5-50 Modello BIM architettonico e strutturale

5.3.3 Analisi delle caratteristiche meccaniche dei materiali

Gli apparecchi murari sono generalmente ad opera incerta in pietra calcarea, con un adeguato rapporto malta/materiale lapideo.

Per avere informazioni sui materiali costituenti il borgo si è ricorso all'analisi di laboratorio di un campione di pietra appartenente alla muratura del Borgo San Rocco (Figura 5-53).



Figura 5-53 Frammento di lapideo costituente la muratura del Borgo San Rocco

Determinazione della porosità aperta

Il primo parametro analizzato è stata la porosità aperta. Esso è il parametro che tiene conto solo dei pori intercomunicanti e accessibili ai fluidi presenti nell'ambiente esterno.

$$Porosità = Porosità_{aperta} + Porosità_{chiusa}$$

Inizialmente è stato determinato il peso allo stato umido del campione mediante l'utilizzo di una bilancia analitica semi-micro a compensazione magnetica (Figura 5-54).



Figura 5-54 Bilancia utilizzata per effettuare le varie pesate

Successivamente il campione è stato essiccato in una stufa termostatica ad una temperatura costante pari a 60°C lasciandolo all'interno di essa fino al raggiungimento di una massa costante per effetto della evaporazione dell'acqua in esso contenuta (Figura 5-55).



Figura 5-55 Stufa termostatica

A tal punto si è proceduto alla misurazione del peso del campione allo stato secco. Il contenuto di umidità del campione è pari a:

$$Umidità [\%] = \frac{Peso_{umido} - Peso_{secco}}{Peso_{secco}} 100 = 0.1\%$$

Subito dopo il campione è stato posto per 24 ore in un essiccatore collegato a una pompa da vuoto per rimuovere l'aria presente nei pori aperti. Successivamente mediante un apposito rubinetto, nell'essiccatore è stata introdotta dell'acqua distillata in modo tale da immergere completamente il campione per il tempo necessario affinché si saturassero i pori aperti. Il campione impregnato di acqua è stato sottoposto a due diverse misurazioni: il peso in aria, avendo cura di asportare le gocce di acqua in eccesso sulla superficie con un panno umido in modo da non asportare anche l'acqua

presente nei pori, e il peso in acqua distillata (pesata idrostatica), ovvero il peso del campione impregnato ridotto della spinta di Archimede; tali misurazioni sono state effettuate mediante l'ausilio di una bilancia idrostatica, riportata in Figura 5-56.



Figura 5-56 Bilancia idrostatica a) misurazione peso impregnato b) misurazione peso immerse

Di seguito sono riportati i valori misurati:

Massa campione			
<i>Secca [g]</i>	<i>Umida [g]</i>	<i>Impregnata [g]</i>	<i>Idrostatica [g]</i>
26.64	26.67	30.42	15.34

Da questi valori, per il Principio di Archimede, si deduce che la differenza tra la massa del campione impregnato e quella idrostatica è pari proprio alla massa di acqua spostata e a sua volta, essendo la densità dell'acqua pari a 1g/cm^3 , al volume di acqua spostata e quindi al volume totale del campione.

Volume totale [cm³]
15.08

Infine tenendo conto della definizione di porosità aperta e delle considerazioni appena fatte otteniamo:

$$\text{Porosità}_{\text{aperta}} [\%] = \frac{\text{Volume}_{\text{pori aperti}}}{\text{Volume}_{\text{totale}}} 100 = \frac{\text{Massa}_{\text{impregnata}} - \text{Massa}_{\text{secca}}}{\text{Massa}_{\text{impregnata}} - \text{Massa}_{\text{idrostatica}}} 100$$

Pertanto il valore di porosità aperta è risultato essere pari a:

Porosità aperta [%]
25.09

Attacco acido

Una prova molto semplice e speditiva che consente di determinare se una sostanza è composta interamente da carbonato di calcio (CaCO₃), consiste nel far reagire un frammento del lapideo oggetto di studio con una soluzione acquosa di acido cloridrico:



Qualora la sostanza sia composta unicamente da carbonato di calcio, essa si scioglierà completamente nell'acido cloridrico dando luogo a una cospicua effervescenza connessa alla evoluzione di anidride carbonica, CO₂(g). In presenza di eventuali impurezze presenti nel campione, queste ultime tendono a formare un residuo insolubile sotto forma di sedimento.

Nel caso in esame, come si può vedere dalla foto seguente, a fine reazione non avendo osservato alcun sedimento, possiamo affermare di avere a che fare con una pietra prevalentemente calcarea (Figura 5-57).



Figura 5-57 Prodotto della reazione chimica avvenuta tra acido cloridrico e carbonato di calcio

Diffrazione a raggi-X

La diffrazione a raggi-X (XRD) viene usata per determinare le fasi cristalline contenute in campioni allo stato solido.

Una misura XRD si basa sulla determinazione delle distanze tra piani reticolari presenti in un solido cristallino utilizzando una sorgente di radiazione con lunghezza d'onda di poche decine di nanometri (nm).

La diffrazione sfrutta la legge di Bragg che fa riferimento alla semplice equazione:

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta$$

dove la variabile d è la distanza tra piani reticolari in un cristallo, la variabile λ è la lunghezza d'onda del fascio di raggi X incidenti e ϑ rappresenta l'angolo di diffrazione ossia l'angolo con cui il fascio di raggi X incide sul cristallo; è un numero intero che nella pratica è pari a 1 (uno) (Figura 5-58).

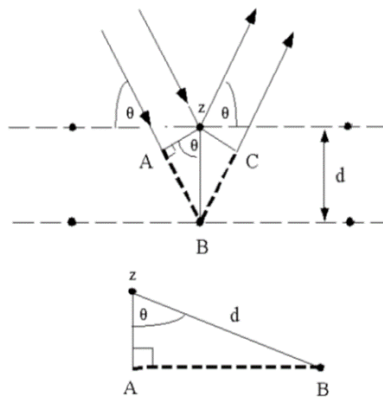


Figura 5-58 Determinazione della Legge di Bragg usando la geometria della riflessione ed applicando la trigonometria

Per cui i raggi X appariranno riflessi dal cristallo solo per angoli che rispettano la precedente relazione.

Per eseguire la prova, come prima fase il campione da analizzare è stato ridotto in polvere così da avere molti cristalli orientati in modo casuale per garantire le condizioni di diffrazione (Figura 5-59).



Figura 5-59 Campione di pietra da analizzare ridotto in polvere

La cristallina identificazione delle fasi cristalline presenti in un campione si ottiene confrontando gli angoli e le intensità dei raggi diffratti con quelli catalogati in opportuni manuali o data-base in cui sono riportati i valori di d (distanza interplanare) e le corrispondenti intensità dei raggi diffratti. Nel caso in esame si è ottenuto un diffrattogramma (Figura 5-60) i cui picchi caratteristici sono quelli della calcite, CaCO_3 .

Tenendo quindi conto della composizione mineralogica del lapideo e della porosità aperta (25 %) possiamo asserire di essere in presenza di un **calcare presumibilmente di origine marina**.

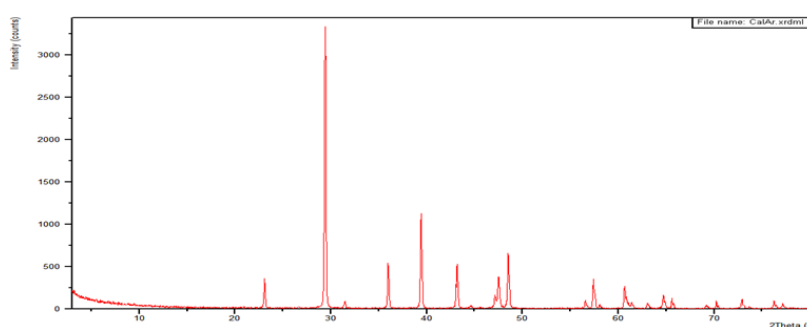


Figura 5-60 Pattern di diffrazione mediante raggi X del lapideo

Utilizzando la tabella C8.5.I della circolare alla normativa NTC18 si possono indicare i parametri meccanici della muratura che costituisce Borgo San Rocco.

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f	τ_0	f_{v0}	E	G	w
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/m^3)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 : 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei quadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Figura 5-61 Parametri meccanici della muratura dalla tabella C8.5.I della circolare 2019

5.3.4 Analisi cinematica

Ammissa di buona qualità la muratura delle pareti di ciascuna US, è stato assunto che esse manifestino un comportamento monolitico per azioni fuori dal piano e si è proceduto all'analisi cinematica lineare dei meccanismi individuati alla luce dell'approccio qualitativo.

Come previsto dalla metodologia sono stati calcolati i moltiplicatori orizzontali dei carichi di collasso α_0 attraverso l'applicazione del Principio dei Lavori Virtuali, chiaramente espresso dalla relazione §C8.7.1.1 della circolare nella NTC18 del 2019.

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \delta_{Py,k} - \sum_{k=1}^N F_k \delta_{Fy,k} - L_i}{\sum_{k=1}^{N_0} (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}}$$

È stata dunque quantificata la corrispondente accelerazione spettrale di attivazione a_0 del meccanismo di ogni unità strutturale per mezzo della relazione §C8.7.1.1.

$$a_{z,SLD} = \frac{a_0 g}{e^* FC}$$

Nell'ipotesi che la porzione rappresentata dal sistema di corpi rigidi si comporti come infinitamente rigida fino all'attivazione del cinematismo, esso si attiva quando l'accelerazione massima alla quota z (a_z) a cui si colloca il meccanismo locale in esame è uguale all'accelerazione a_0 .

Dall'uguaglianza fra a_0 e a_z si determina $a_{g,SLD}$.

$$a_{z,SLD} = \frac{a_0 g}{e^* FC}$$

$$a_z(z) = \sqrt{\sum (a_{z,k}(z))^2}$$

Nella verifica di meccanismi locali in edifici multipiano è, in genere, sufficiente riferirsi al solo primo modo di vibrare nella direzione di verifica, in quanto è quello che induce la domanda di spostamento più significativa, dunque:

$$a_z(z) = S_e(T_k, \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2}$$

$S_e(T, \xi)$ è lo spettro di risposta elastico al suolo, valutato per il periodo equivalente T e lo smorzamento viscoso equivalente ξ dell'elemento non strutturale, dell'impianto o del meccanismo locale considerato.

$$S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ , diversi dal 5% mediante la relazione

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55$$

Calcolo dell'accelerazione al suolo $a_{g,SLV}$ moltiplicando $a_{g,SLD}$ per un fattore di comportamento q , che in assenza di valutazioni più accurate assumiamo pari a 2:

$$a_{g,SLV} = q \cdot a_{g,SLD}$$

Infine si è eseguita la verifica allo SLV accertandosi che la capacità sia maggiore della domanda, posta pari all'accelerazione di riferimento al suolo a_g valutata per la probabilità di superamento dello SLV nella vita di riferimento, dove la domanda è a_g ovvero l'accelerazione di riferimento al suolo valutata per la probabilità di superamento dello SLV nella vita di riferimento (§3.2 delle NTC).

A titolo di esempio si riportata la procedura di analisi e successiva verifica della facciata a tre piani appartenente all'U.S. 10B (Figura 5-62), per la quale, alla luce dell'analisi qualitativa si è ipotizzato un meccanismo di ribaltamento semplice attorno alla cerniera A, che coincide con lo spigolo esterno alla base della parete. Ammessa la fattura della muratura della parete di buona qualità, è stato assunto che essa manifesti un comportamento monolitico per azioni fuori dal piano.

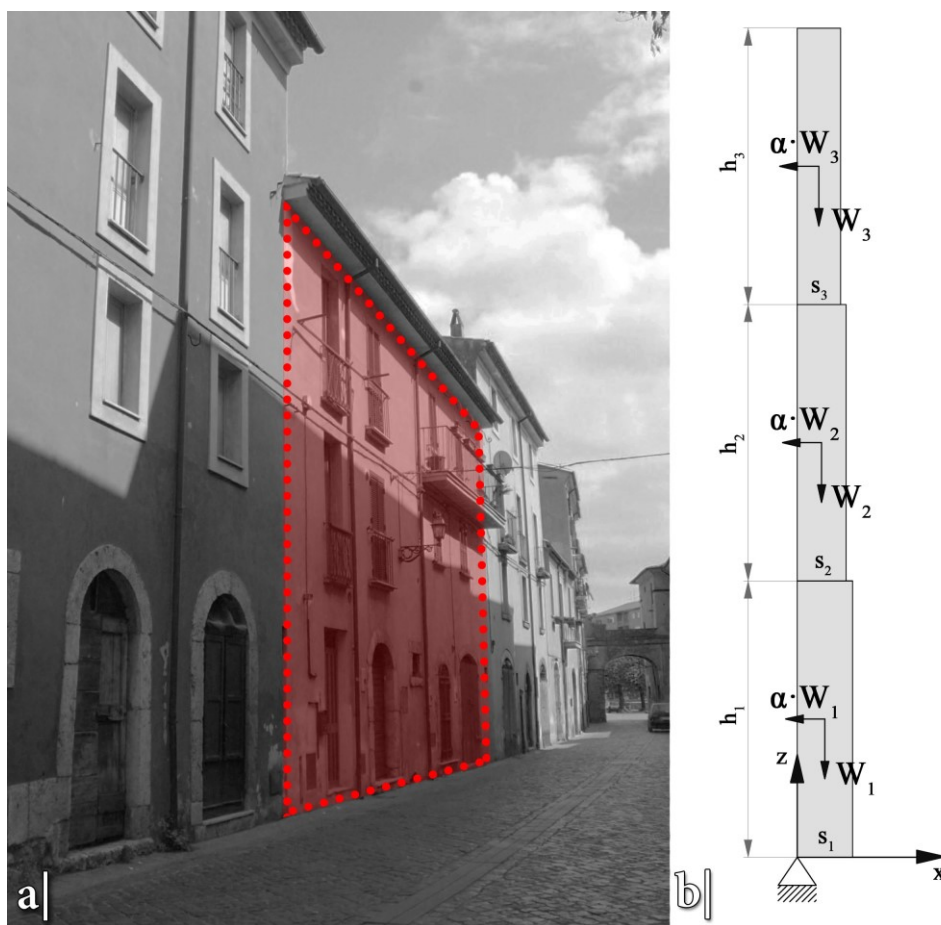


Figura 5-62 Edificio 10B: a) foto della facciata; b) schema della parete per il meccanismo di ribaltamento globale

Dato che nell'edificio esaminato la copertura e i solai di tutti i livelli sono orditi parallelamente alla facciata, mentre risultano assenti archi, volte e tiranti, si è fatto riferimento allo schema riportato in Figura 5-62, dove sono stati indicati con:

- W_1, W_2, W_3 i pesi propri rispettivamente delle pareti dei piani 1, 2 e 3;
- α il moltiplicatore delle forze orizzontali;
- h_1, h_2 e h_3 le altezze interpiano rispettivamente ai piani 1, 2 e 3;
- s_1, s_2 e s_3 lo spessore rispettivamente delle pareti dei piani 1, 2 e 3.

Tabella 5-3 Dati di input per l'analisi cinematica dell'US 10B

Piano	1	2	3
Spessore macroelemento s [m]	0.75	0.70	0.60
Larghezza della fascia sottofinestra al netto delle aperture [m]	8.19	12.29	10.49
Larghezza della fascia intermedia al netto delle aperture [m]	8.19	10.49	10.49
Larghezza della fascia soprafinestra al netto delle aperture [m]	14.09	14.09	14.09
Altezza della parete (interpiano) h [m]	3.30	3.20	3.50
Braccio orizzontale del carico in testa alla parete d [m]	0.38	0.35	0.30
Braccio orizzontale dell'azione di archi-volte [m]	0.00	0.00	0.00
Quota punto applicazione spinta archi-volte [m]	0.00	0.00	0.00
Quota del baricentro della parete y_{Gi} [m]	1.80	1.67	1.87
Peso specifico della muratura γ [kN/m ³]	16	16	16
Tipologia solaio	LC	LC	LC
Orditura solaio adiacente	//	//	//
Ammorsamento sulle pareti perpendicolari alla facciata	No	No	No
Peso proprio della parete W [kN]	366	420	393
Carico trasmesso dal solaio P_{si} [kN]	0	0	0
Spinta statica trasmessa dalla copertura P_H [kN]	0	0	0
Componente verticale della spinta di archi o volte F_{Vi} [kN]	0	0	0
Componente orizzontale della spinta di archi o volte F_{Hi} [kN]	0	0	0
Azione del tirante T [kN]	0	0	0

Infine, si è eseguita la verifica semplificata con fattore di struttura q allo SLV verificando che la capacità sia maggiore della domanda. A tal fine si è considerata come capacità l'accelerazione al suolo che attiva il meccanismo $a_{g,SLV}$ e come domanda l'accelerazione di riferimento al suolo a_g valutata con riferimento alla probabilità di superamento dello SLV nella vita di riferimento (Figura 5-64).

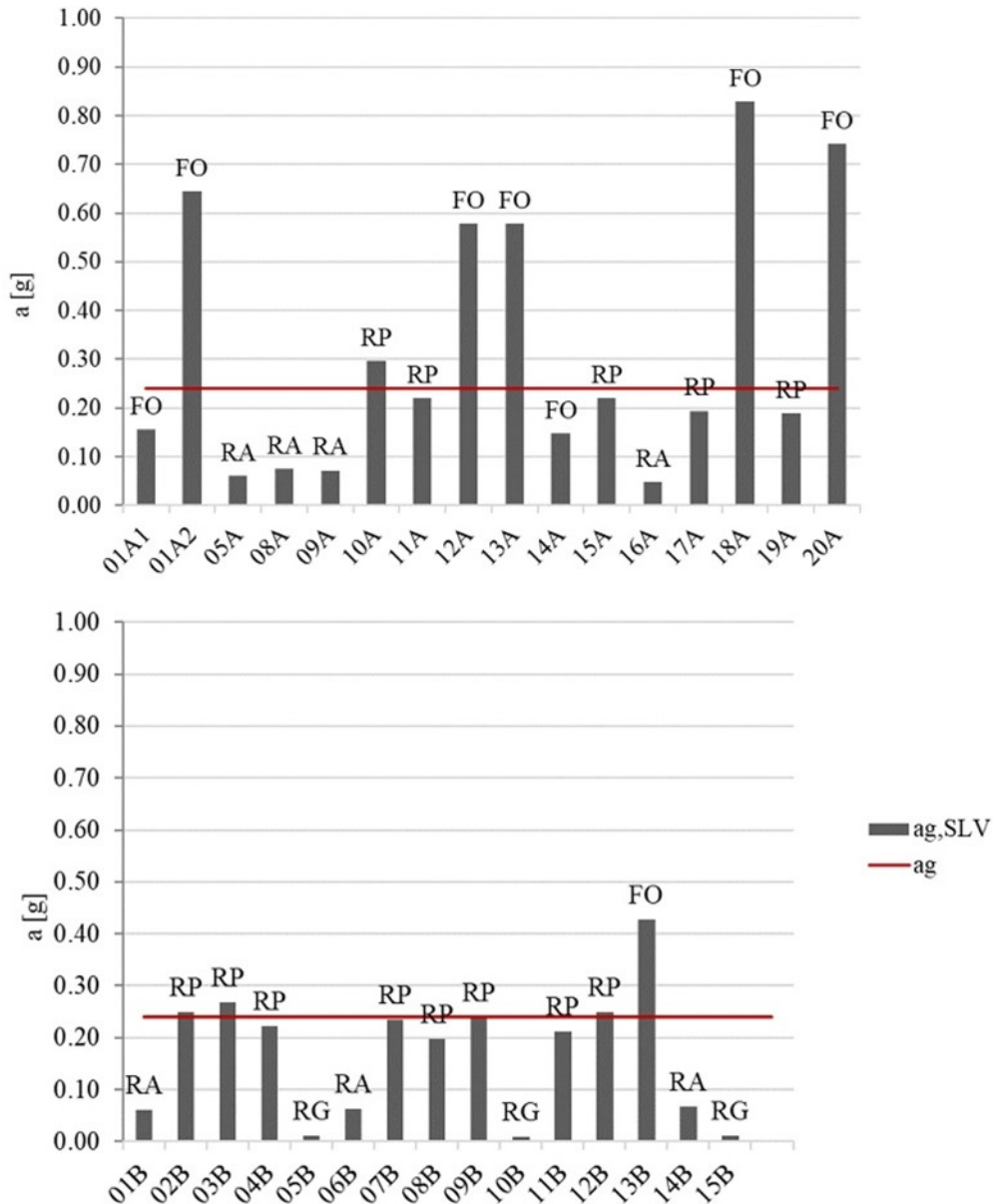


Figura 5-63 Confronto fra capacità e domanda: a) comparto A, b) comparto B

Nei diagrammi infatti vengono mostrati i risultati ottenuti per ogni unità strutturale componente l'aggregato in cui si osserva che per la maggior parte delle facciate è soggetta all'attivazione del meccanismo individuato nel livello precedente. In

particolare gli edifici che hanno un valore di accelerazione di attivazione del meccanismo inferiore alla PGA (in rosso) sono soggetti all'attivazione del cinematismo.

I risultati di carattere quantitativo ottenuti dall'analisi cinematica lineare di ogni facciata possono essere visualizzati direttamente sulla piattaforma BIM realizzata. Infatti associando i risultati come "attributi" ad ogni facciata modellata in BIM è possibile visualizzarli cromaticamente. Come si evince dalle immagini seguenti ad ogni edificio è associata l'informazione sul valore di $a_{g,SLV}$ [g]. Inoltre confrontando la capacità con la domanda è possibile visualizzare gli esiti della verifica in accordo con le NTC18.

5.3.5 Visualizzazione dei risultati

I risultati delle analisi cinematiche proposte e gli esiti delle verifiche ai sensi delle NTC18 sono stati visualizzati all'interno del sistema BIM associando le informazioni ottenute come parametri delle facciate realizzate. In questo modo è possibile una consultazione semplificata dei risultati attraverso una scala cromatica per l'indicazione dell'acceleratore di attivazione del meccanismo di collasso (Figura 5-64) ed attraverso una visualizzazione verde/rosso per gli esiti delle verifiche (Figura 5-65).

Si ottengono così informazioni relative alla vulnerabilità sismica degli edifici indicando le strutture che presentano maggiori criticità.

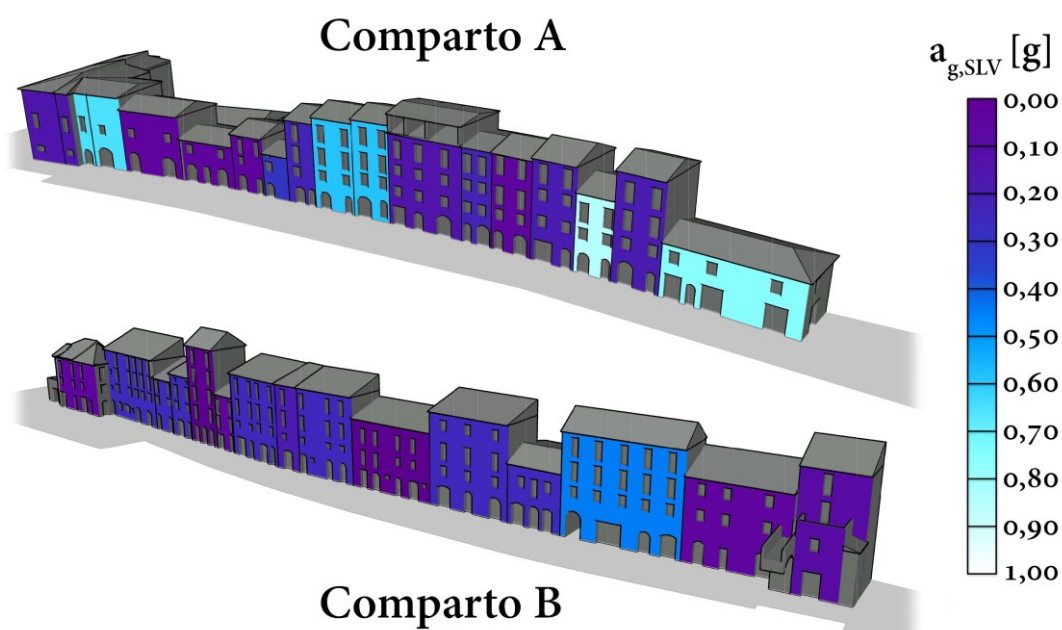


Figura 5-64 Risultati dell'analisi cinematica lineare in termini di accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0

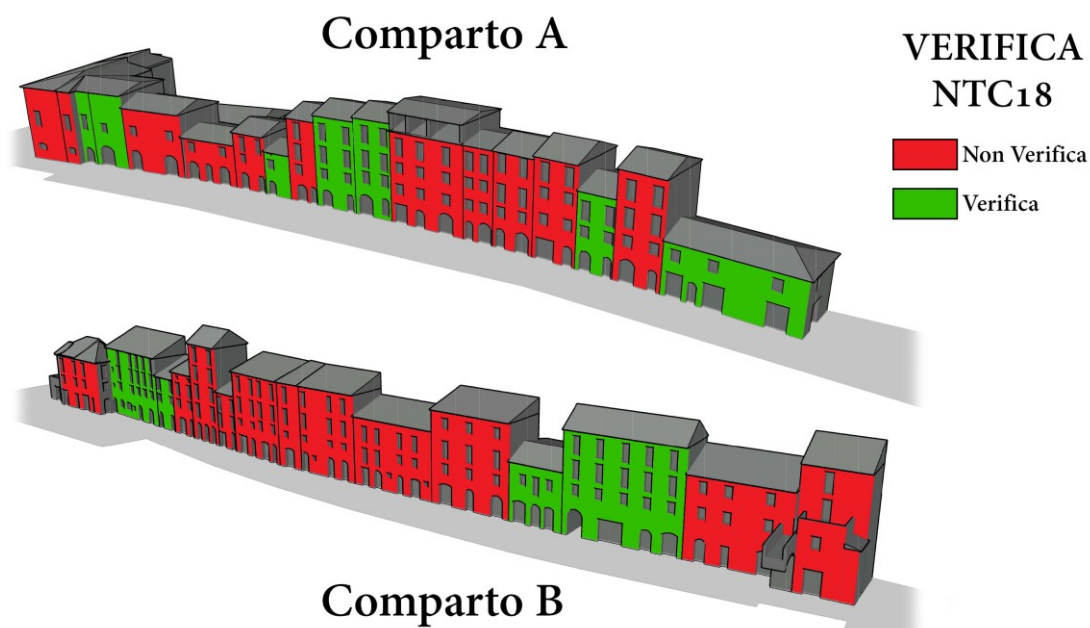


Figura 5-65 Risultati della verifica semplificata con fattore di struttura q allo SLV

5.4 Confronto dei risultati

I risultati ottenuti attraverso la metodologia illustrata consentono di avere informazioni relative alla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura indicando le strutture che presentano maggiori criticità nei confronti dei meccanismi di collasso locale. I modelli sono rappresentativi del caso di studio di Borgo San Rocco scelto come riferimento per l'applicazione della metodologia multilivello proposta: il primo livello di carattere qualitativo basato su un rilievo speditivo e il secondo livello basato su un metodo di analisi quantitativa che prevede un livello di conoscenza maggiormente approfondito.

Quello che si intende valutare in questa sede è l'attendibilità del metodo di analisi qualitativa di primo livello alla luce dei risultati ottenuti dall'applicazione del metodo di analisi quantitativa basata su un rilievo maggiormente dettagliato. Quest'ultimo, essendo basato sulle analisi cinematiche proposte dalla normativa il cui livello di dettaglio è legato strettamente al livello di conoscenza ottenuto per mezzo del rilievo proposto nell'approccio di secondo livello fornisce una indicazione numerica sull'accelerazione di attivazione del meccanismo di collasso. Infatti, per ogni US dell'aggregato è possibile avere una chiara indicazione su quale possa essere il valore di accelerazione sismica che attivi il meccanismo. Attraverso il confronto diretto con la PGA attesa al sito ($a_{g,SLV}=0,24g$ per il comune di Sora) è possibile definire gli edifici per i quali il cinematisimo si attiva, ossia quando la accelerazione di attivazione del

meccanismo sia inferiore alla PGA del sito; in caso contrario il meccanismo non si attiva. La metodologia, basata come già detto sull'approccio cinematico proposto nella corrente Normativa Tecnica per le Costruzioni del 2018 e su un rilievo e una conoscenza del costruito estremamente dettagliata realizzata per mezzo di innovative tecniche di rilievo, fornisce dei risultati attendibili. Nello specifico si osserva che delle 31 US prospicienti la strada, solo 10 sono in accordo con i criteri di verifica delle NTC18. In altri termini per 21 US il meccanismo di collasso si attiva nei confronti della PGA attesa al sito.

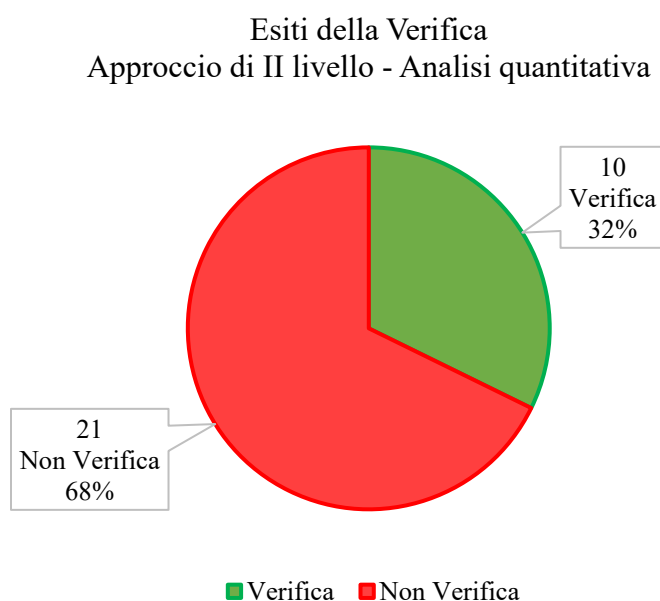


Figura 5-66 Esiti della verifica dell'approccio quantitativo

Come è possibile osservare dalla Figura 5-66 il 68% delle US presenta una elevata vulnerabilità, rispetto al 32% delle US meno vulnerabili.

Tale risultato può essere messo a confronto con l'indicazione fornita dall'approccio quantitativo basato su un rilievo speditivo attraverso tecniche di rilievo semplificate. Il primo livello di analisi consente di determinare il più probabile meccanismo di collasso delle facciate degli edifici in muratura e consente quindi di avere una chiara indicazione su quali possano essere gli edifici più vulnerabili all'interno degli aggregati strutturali. Nel caso specifico, considerando i meccanismi che causano il collasso dell'intera facciata dell'edificio e quindi pregiudicano la stabilità della struttura e non garantiscono il comportamento scatolare dell'edificio in muratura come il ribaltamento globale della facciata e il ribaltamento lungo le aperture si può

affermare che 8 US delle 31 prospicienti la strada non risultano essere vulnerabili (Figura 5-67).

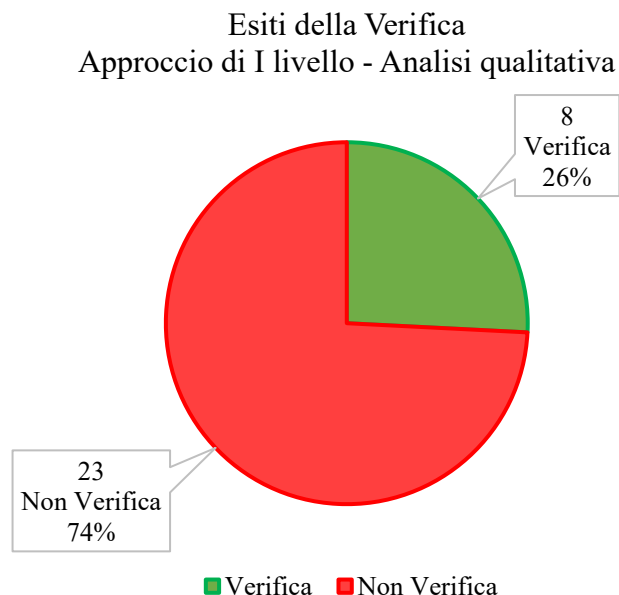


Figura 5-67 Esiti della verifica dell'approccio qualitativo

Dal confronto si osserva che i risultati ottenuti dall'approccio di livello I sono a vantaggio di sicurezza rispetto all'approccio di II livello. Per tale motivo si può affermare che il primo livello di analisi, nonostante sia basato su un approccio speditivo e in altri termini economico, può essere considerato attendibile alla luce dei risultati ottenuti con il metodo quantitativo che prevede un livello di conoscenza maggiormente approfondito e quindi oneroso. Il primo livello potrebbe quindi fornire uno strumento preliminare che consenta di individuare gli edifici maggiormente vulnerabili (Figura 5-68) su cui è poi possibile eseguire indagini dettagliate come proposto dal secondo livello di analisi per avere delle indicazioni precise sulla vulnerabilità a cui sono soggetti (Figura 5-69).

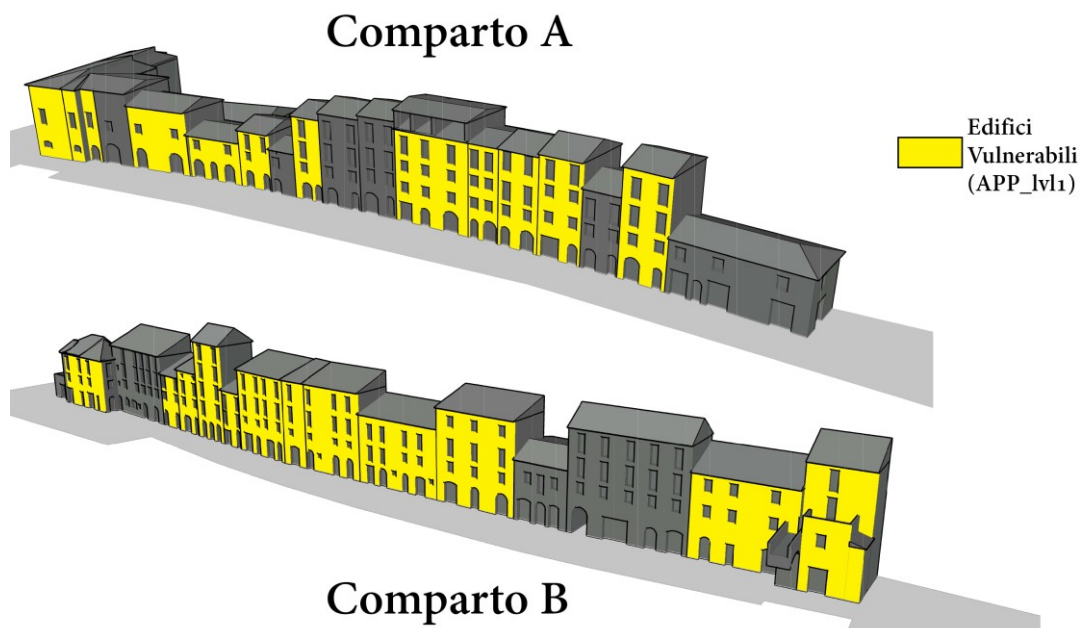


Figura 5-68 Individuazione degli edifici vulnerabili secondo l'approccio qualitativo

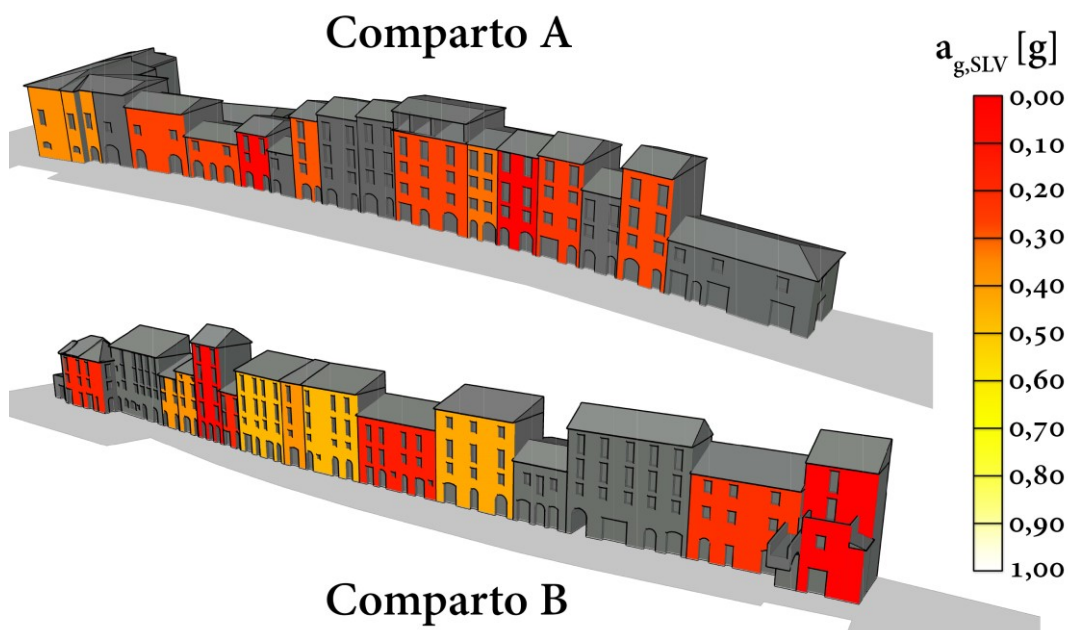


Figura 5-69 Individuazione degli edifici vulnerabili secondo l'approccio quantitativo alla luce dei risultati dell'approccio qualitativo

5.5 Bibliografia

- Beranger, E. M. (1995). Un frammento altomedioevale da San Domenico di Sora.
- Bettini, M. C., & Nicosia, A. (Eds.). (2011). *Le mura megalitiche: il Lazio meridionale tra storia e mito*. Gangemi Editore spa.
- Biddittu, I., Cassoli, P., & Malpieri, L. (1967). Stazione musteriana in Valle Radice nel comune di Sora (Frosinone). *Quaternaria*, 9, 321-348.
- Branca, C. (1847). *Memorie storiche della città di Sora* (Vol. 46). Forni.
- Fedele, Francesco (1988). Giustiniano Nicolucci e la fondazione dell'antropologia in Italia. *Alle origini dell'antropologia italiana: Giustiniano Nicolucci e il suo tempo*, 37-60.
- Galli, P. A. C., & Naso, J. A. (2009). Unmasking the 1349 earthquake source (southern Italy): paleoseismological and archaeoseismological indications from the Aquae Iuliae fault. *Journal of Structural Geology*, 31(2), 128-149.
- Lauri A. (1933) "Note illustrative sulla città di Sora", Sora.
- Lauri. A. (1914) *Sora, Isola Liri e dintorni*, I ediz. Sora, D'Amico; II ediz.
- Leonardi, S. (2010). *La Valle del Liri: da Terra di Lavoro a distretto industriale*. In *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA*, Brescia.
- Locati, M., CAMASSI, R. D., Rovida, A. N., Ercolani, E., BERNARDINI, F. M. A., Castelli, V., ... & D'Amico, S. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database.
- Martini, A. (1982). *Industria della carta e proletariato di fabbrica a Isola del Liri nel sec. XIX*. *Studi Romani*, 30(2), 196.
- Pacichelli G.B. (1703) "Il regno di Napoli in dodici province", Napoli.
- Santangelo, M. (2017). *Le cartiere di Isola del Liri: storia e valorizzazione di un patrimonio di archeologia industriale* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

CAPITOLO 6.

LE NOVITÀ INTRODOTTE DALLA PROCEDURA MULTILIVELLO

6.1 Un'applicazione pratica della metodologia multilivello

La metodologia introdotta nei capitoli precedenti trova ampia applicabilità nelle procedure già in atto in Italia per la mitigazione del rischio sismico e per l'analisi della vulnerabilità. Tra queste, la Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), introdotta con l'OPCM n. 4007 del 29 febbraio 2012 che si associa alla microzonazione sismica di I livello, è senza dubbio la più innovativa nel settore della gestione dell'emergenza in caso di sisma. La CLE verifica se il piano messo in atto dalla protezione Civile può considerarsi affidabile poiché valuta le interferenze, intese come ribaltamenti semplici delle facciate dei fabbricati, lungo le strade di evacuazione. La procedura di valutazione si basa su parametri che nella realtà non concorrono al ribaltamento delle facciate pertanto in alcuni casi si è costretti a definire interferente un edificio che nella realtà non lo sarebbe. La metodologia multilivello interviene con l'individuazione corretta del cinematismo garantendo un'informazione attendibile nella valutazione del piano. Di seguito un approfondimento del tema e il confronto con altri sistemi di valutazione/mitigazione attivi in Italia, come il progetto CARTIS.

6.2 L'integrazione della metodologia per la gestione dell'emergenza sismica

In occasione di un sisma, si definiscono condizioni limite le soglie o i livelli di danneggiamento fisico e funzionale al raggiungimento dei quali l'insediamento, per il danneggiamento dei diversi sistemi che lo compongono, subisce modificazioni significative della propria funzionalità, progressivamente crescenti, tali da compromettere il mantenimento. Le Condizioni Limite per l'insediamento, quindi,

corrispondono a livelli crescenti di perdita di funzionalità dei suoi componenti e sono classificate come segue:

- a) CLO: condizione limite di operatività per l'insediamento - si compromette la funzione residenziale;
- b) CLD: condizione limite di danno per l'insediamento - si danneggiano le funzioni urbane ordinarie;
- c) CLV: condizione limite di salvaguardia della vita dell'insediamento - si interrompono le funzioni urbane principali;
- d) CLC: condizione limite di prevenzione del collasso dell'insediamento - si interrompono le funzioni strategiche;
- e) CLE: condizione limite per l'emergenza - si interrompono le funzioni per la gestione dell'emergenza.

In Figura 6-1 si osservano le diverse condizioni limite a seconda dell'intensità del sisma in funzione del danno (o perdita di funzionalità dei sistemi urbani) (Dolce et al., 2014):

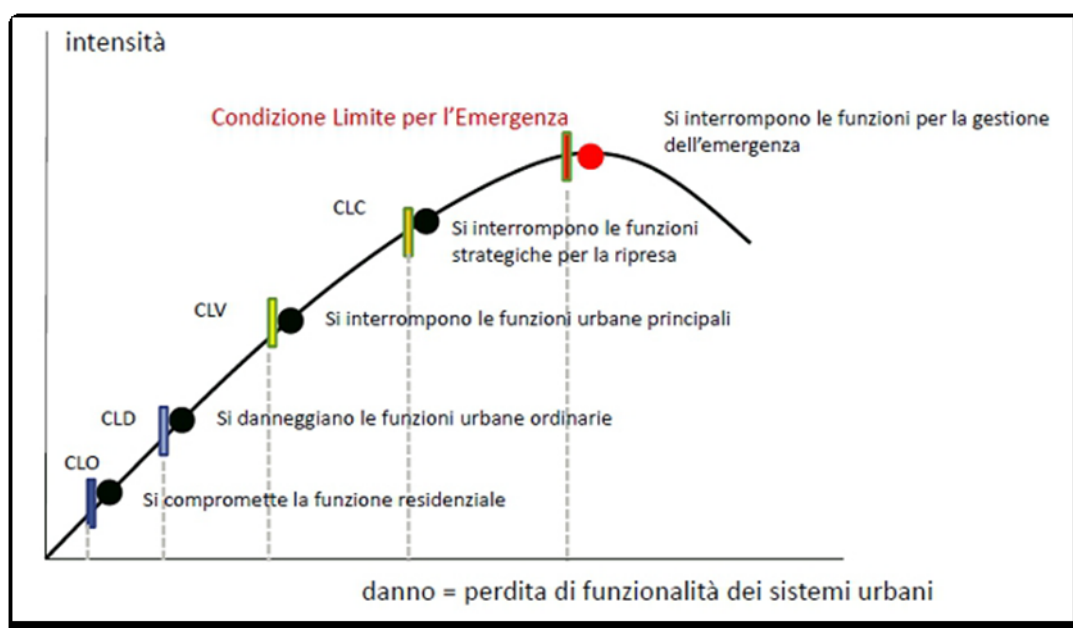


Figura 6-1 Diagramma danno – intensità per l'individuazione delle condizioni limite

6.2.1 Analisi della condizione limite per l'emergenza

La Condizione Limite per l'Emergenza è la condizione più gravosa al fine del mantenimento delle funzionalità urbane. Essa è stata introdotta con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 4007 del 29 febbraio 2012 sulla base degli indirizzi espressi della Commissione istituita prevista con l'OPCM n. 3843/2010 e

istituita dal DPCM del 21 aprile 2011. La citata OPCM introduce la CLE dell'insediamento urbano, analisi che consente di integrare le azioni per la mitigazione del rischio sismico, migliorando la gestione delle attività di emergenza.

Dall' Art. 18 comma 2 viene definita come Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano “quella condizione al cui superamento, a seguito del manifestarsi dell'evento sismico, pur in concomitanza con il verificarsi di danni fisici e funzionali tali da condurre all'interruzione della quasi totalità delle funzioni urbane presenti, compresa la residenza, l'insediamento urbano conserva comunque, nel suo complesso, l'operatività della maggior parte delle funzioni strategiche per l'emergenza, la loro accessibilità e connessione con il contesto territoriale.” (CLE, 2014).

Il concetto di CLE gioca un ruolo essenziale nell'introdurre alcuni elementi di analisi delle strutture nella pianificazione di emergenza e nel rendere quindi in qualche modo rilevante il Piano di Emergenza nei confronti della Pianificazione del Territorio.

Per assicurarsi che la CLE sia perseguita è necessario verificare che:

- le parti del sistema urbano ritenute strategiche per la migliore gestione dell'emergenza garantiscano i profili di funzionalità fisiche (resistenza al sisma) e relazionali (connettività ed accessibilità) tali da assicurare la loro permanenza in caso di evento e la loro utilizzabilità a supporto dell'intervento in emergenza;
- nel caso che tale verifica dia risultati non soddisfacenti, determinare le azioni necessarie per garantire il comportamento atteso.

Gli studi di CLE rappresentano dunque un elemento in grado di mettere in connessione:

- la pianificazione dell'emergenza che dagli studi stessi viene verificata;
- la pianificazione urbanistica che invece ne assume orientamenti finalizzati alla riduzione della vulnerabilità del sottosistema urbano finalizzato a supportare la funzione strategica di gestione dell'emergenza.

L'analisi della CLE deve essere intesa come strumento di verifica di alcuni elementi fisici del sistema di gestione dell'emergenza già individuato nel Piano di protezione civile e non può in alcun modo essere sostitutiva del piano stesso, in particolar modo nell'individuazione dei siti e delle strutture strategiche di gestione dell'emergenza. Il presupposto dell'analisi della CLE è il sostanziale rilevamento di quanto già definito nei piani di protezione civile (edifici strategici e aree di emergenza). Ove l'analisi della CLE portasse alla luce eventuali incongruenze nelle scelte effettuate nella

pianificazione, dovranno essere valutate dall'Amministrazione competente e potranno essere valutate eventuali azioni conseguenti, ad esempio nuove indicazioni di piano, priorità di intervento, normative e indicazioni specifiche su usi e trasformazioni ammissibili.

La valutazione del sistema di gestione dell'emergenza, e cioè dell'attività conseguente all'analisi della CLE, consentirà di esprimere un giudizio basato sul confronto tra lo stato attuale e le prestazioni richieste al sistema nel suo complesso. La valutazione della differenza tra condizione rilevata del sistema di emergenza e condizione di progetto prevista attraverso il piano, rappresenta l'obiettivo finale dell'analisi proposta e presuppone anche valutazioni di tipo sistemico, come ad esempio valutare se la crisi di un elemento conduce o meno alla crisi dell'intero sistema.

L'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) viene condotta seguendo le modalità di rilevamento e archiviazione secondo specifici Standard (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza – CLE).

Per l'analisi della CLE di uno specifico insediamento urbano è indispensabile innanzitutto identificare:

- le strutture finalizzate alla gestione dell'emergenza;
- il sistema di interconnessione fra tali strutture e il sistema di accessibilità rispetto al contesto territoriale.

Obiettivo dell'analisi CLE è di avere il quadro generale di funzionamento dell'insediamento urbano per la gestione dell'emergenza sismica, anche in relazione al contesto territoriale. Per questo motivo la conduzione dell'analisi CLE necessita di due step fondamentali:

- 1) Reperimento di documentazione e cartografie
- 2) Compilazione delle schede di rilevamento

Schede per l'analisi della CLE

Sia per le strutture finalizzate alla gestione dell'emergenza, sia per il sistema di interconnessione e accessibilità, è necessario acquisire le informazioni minime indispensabili per la loro valutazione. A tal fine sono state predisposte 5 schede specifiche di rilevamento:

- 1) Edifici Strategici
- 2) Aree di Emergenza

- 3) infrastrutture di Accessibilità e Connessione
- 4) Aggregati Strutturali
- 5) Unità Strutturali

Un apposito software in libera distribuzione (*SoftCLE*) facilita le attività di inserimento dei dati. Le schede sono strutturate in maniera tale da costituire un primo livello conoscitivo del sistema in cui rientrano alcune conoscenze di base prevalentemente di tipo qualitativo. Per ogni tipo di scheda vengono raccolte informazioni generali, dati di esposizione, di vulnerabilità e dati in cui si considera il rapporto con la morfologia del terreno e con la microzonazione sismica. In altri termini vengono rilevati dati ritenuti fondamentali per un primo approccio valutativo in termini di rischio. Le schede così predisposte verificano tale sistema di gestione dell'emergenza, identificando i manufatti e i relativi diversi ruoli, da una parte di funzioni di gestione, dall'altra di accessibilità al sistema. Tutte le informazioni rilevate attraverso le schede costituiscono la base conoscitiva minima per effettuare valutazioni del sistema di emergenza, nonché dei possibili percorsi di approfondimento e diagnosi finalizzate al miglioramento del sistema stesso.

Individuazione del sistema di gestione dell'emergenza e degli elementi interferenti

La procedura per l'analisi della CLE viene operata seguendo tre diverse fasi in sequenza:

- 1) Fase preparatoria, precedente il rilievo diretto
- 2) Fase di rilievo diretto o di rilevamento sul campo
- 3) Fase successiva al rilievo

La prima operazione da svolgere è la preparazione della base cartografica con una mappa che consenta la visualizzazione dell'intero sistema di gestione dell'emergenza.

Successivamente si individuano le funzioni strategiche e le aree di emergenza a partire dai documenti quali piani di emergenza o di protezione civile con eventuali cartografie allegate. In tali piani sono indicati gli edifici strategici e le aree di emergenza essenziali per la gestione dell'emergenza sismica. Per le aree di emergenza individuate nel piano di emergenza o di protezione civile, sono da considerare le aree di ammassamento e di ricovero, in quanto le aree di attesa non sono strettamente funzionali alla gestione dell'emergenza post-sismica (sono utilizzate solo temporaneamente nella fase immediatamente successiva all'evento). Per le infrastrutture di accessibilità e di connessione individuate nel piano di emergenza,

nell'analisi della CLE sono da considerare solo quelle che connettono reciprocamente le funzioni strategiche e le aree di emergenza selezionate.

Terminata la fase preparatoria per l'analisi della CLE, predisposte quindi le cartografie complete con gli identificativi è possibile iniziare la fase del rilievo diretto. Durante il rilievo sarà possibile verificare la corrispondenza della situazione reale con gli elaborati predisposti nella fase preparatoria (consistenza, localizzazione effettiva e articolazione) confermando le numerazioni attribuite agli edifici strategici e aggregati strutturali, alle aree di emergenza e alle infrastrutture di accessibilità e connessione. Durante il sopralluogo è possibile individuare gli aggregati strutturali, con relative unità strutturali interne e unità strutturali isolate interferenti con infrastrutture di accessibilità e connessione o con aree di emergenza. Con il termine **interferenza** si intende una particolare condizione secondo la quale alcuni elementi qualificanti l'analisi della CLE sono messi in mutua relazione: unità strutturali e aggregati strutturali da una parte; infrastrutture e aree dall'altra. Tale condizione, regolamentata da precisi rapporti geometrici, rappresenta un indicatore fondamentale per la valutazione della potenziale fruibilità in caso di emergenza delle infrastrutture (di accesso e connessione) e delle aree di emergenza presenti nell'analisi della CLE. Infatti, la fruibilità in emergenza di tali manufatti non dipende soltanto da fattori intrinseci al manufatto stesso, ma da fattori esogeni ad essi, che tuttavia potrebbero, in caso di evento sismico, divenire causa di un danno indiretto tale da inibirne la funzionalità. Il danno indiretto su tali elementi (infrastrutture ed aree di emergenza) è rappresentato, nel caso specifico, dalla possibilità che gli edifici prospicienti su tali elementi siano interessati in caso di sisma da meccanismi di collasso fuori dal piano. Tra i meccanismi, il più dannoso ai fini della fruibilità di un'infrastruttura o di un'area, è certamente quello di ribaltamento globale della facciata. Tale meccanismo, ai fini della presente analisi, viene considerato dannoso solo nel caso in cui la sede stradale risulti interessata per intero dall'eventuale crollo della facciata. Di conseguenza la verifica sull'edificato richiesta dall'analisi della CLE non è estesa a tutti gli edifici prospicienti, ma soltanto a quelli che ricadano nella più gravosa condizione di interferenza, di cui alle seguenti definizioni. Un edificio (unità strutturale) si definisce interferente su una infrastruttura, quando la sua altezza (massima nel caso in cui siano presenti differenze di quota), misurata all'imposta della copertura, è superiore rispetto alla distanza L tra il piede dell'edificio ed il limite opposto della strada (Figura 6-2).

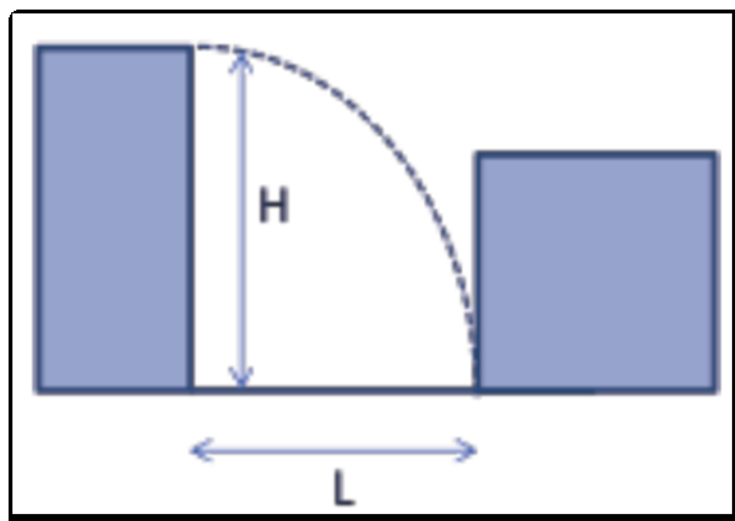


Figura 6-2 Condizione di interferenza su infrastrutture di accesso/connessione

Tale condizione, rapportata all'aggregato strutturale, conduce a definire interferente quell'aggregato in cui almeno un'unità strutturale prospiciente l'infrastruttura o l'area di emergenza ricada nella condizione di interferenza (Figura 6-3).

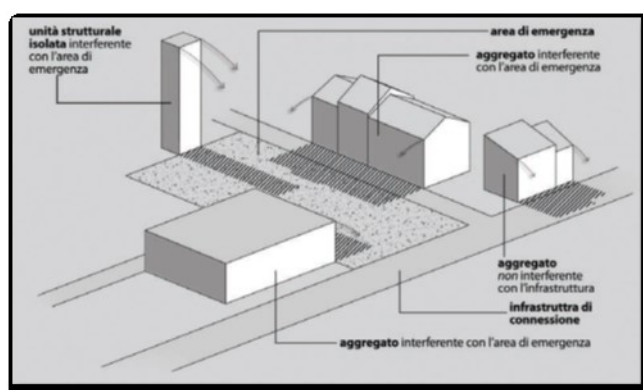


Figura 6-3 Aggregati strutturali e unità strutturali interferenti con infrastrutture e aree di emergenza

Nella fase successiva al rilievo vengono svolte importanti operazioni. Vengono completate le schede rilevate con tutti i dati non desumibili dal rilievo diretto (misurazioni, dati sulle trasformazioni). Viene compilata la scheda indice nel quale sono indicati i dati relativi al Comune soggetto all'Analisi della CLE e il numero di schede che compongono la stessa.

Successivamente vengono informatizzate le schede di rilievo (software *SoftCLE*). L'informatizzazione dei dati cartografici tramite la rappresentazione degli edifici strategici, delle aree di emergenza, delle infrastrutture di connessione e accessibilità e

degli elementi interferenti sulla base cartografica viene operata secondo gli standard di archiviazione.

6.2.2 Analisi della CLE per il comune di Sora

Per testare una possibile applicazione della metodologia multilivello proposta nella tesi, è stata applicata la procedura per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano relativa al comune di Sora e confrontata con i risultati ottenuti dalla metodologia mostrati nel capitolo precedente.

L'analisi della CLE è stata possibile applicarla poiché il Comune di Sora ha aderito alla stesura del Piano di Protezione Civile Comunale e alla realizzazione delle Carte di Microzonazione Sismica di primo livello, i quali rappresentano la documentazione di base per procedere all'individuazione del sistema di emergenza e alla pianificazione delle successive procedure di analisi.

Dalla lettura del Piano di Protezione Civile del Comune di Sora è stato possibile identificare gli elementi per l'analisi della CLE e rappresentarli sulla cartografia, applicando gli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica* con riferimento alla Legenda prevista per la Carta degli elementi per l'analisi della CLE (Figura 6-4).

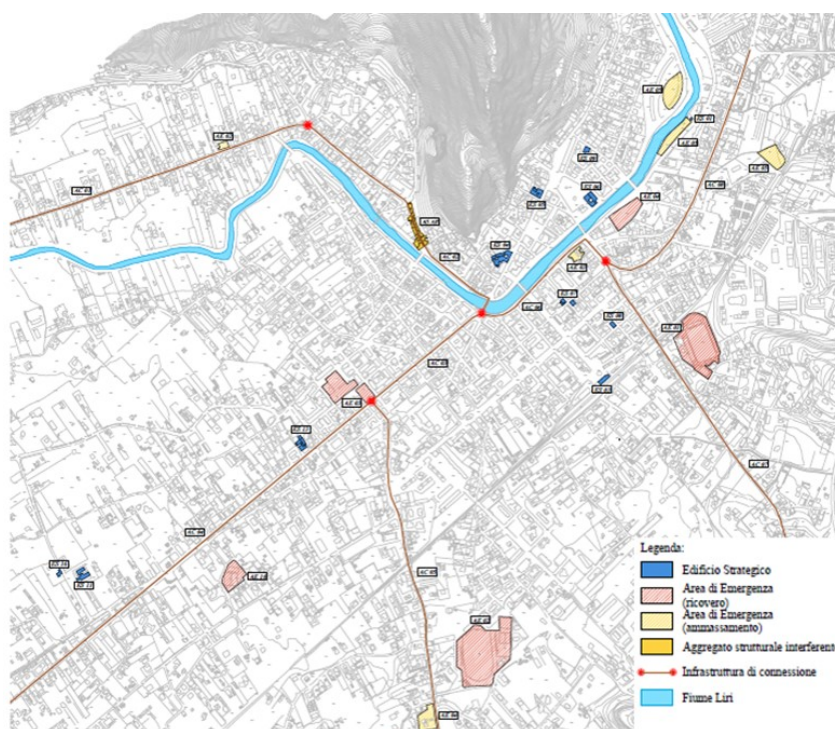


Figura 6-4 Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza del comune di Sora

Prima di tutto sono stati individuati gli Edifici Strategici. Di seguito sono state identificate le Aree di Emergenza, suddivise in Aree di ammassamento e Aree di ricovero e quindi tracciate le infrastrutture di Connessione, che permettono di mettere in relazione tra loro le Edifici Strategici e Aree di Emergenza. Sono stati in ultimo collocati i nodi nelle intersezioni tra più infrastrutture di connessione (Figura 6-5).

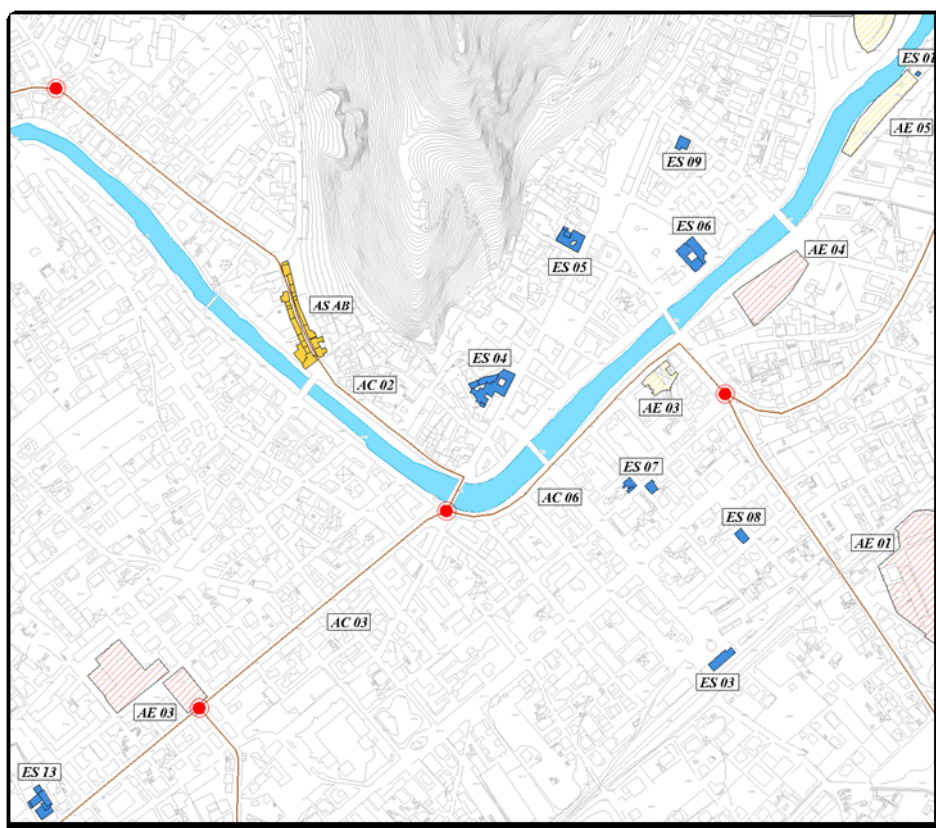
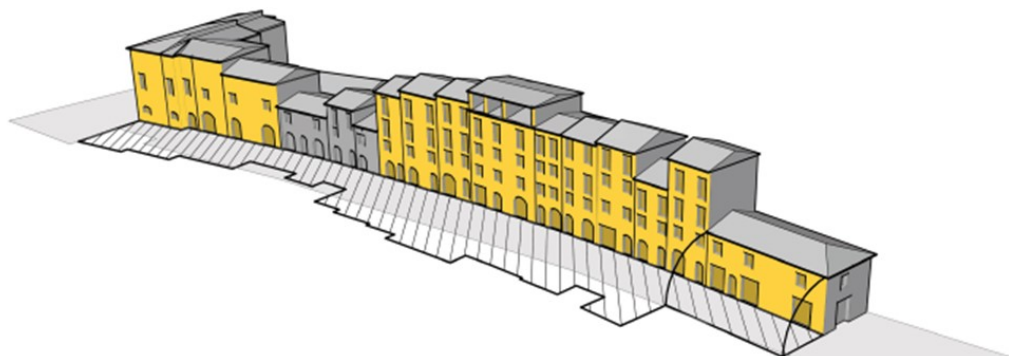


Figura 6-5 Stralcio dell'elaborazione del Piano di Protezione Civile di Sora

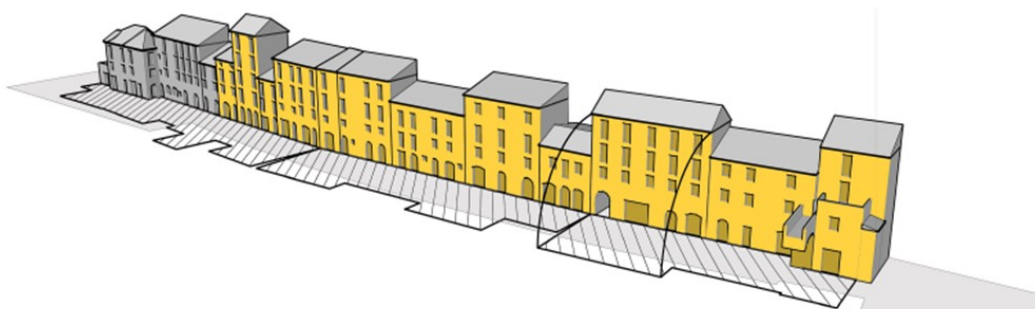
Si è posta l'attenzione sull'aggregato strutturale di Borgo San Rocco, caso di studio del lavoro di ricerca, in quanto rappresenta un problema di rilevante importanza per la gestione dell'emergenza e garanzia di sicurezza nelle fasi immediatamente successive all'emergenza e successive all'evento. Nei fatti la crisi dell'aggregato, e quindi del singolo elemento componente l'agglomerato, porterebbe alla crisi dell'intero sistema. Infatti Borgo San Rocco può presentare problemi di interferenza con la strada che lo delimita, che dal Piano di Protezione Civile Comunale risulta essere una infrastruttura di connessione in caso di emergenza.

A seguito della compilazione della scheda di rilievo proposta dal "manuale della CLE" per ogni unità strutturale che compone l'aggregato è stato possibile definire

quali sono gli edifici interferenti, secondo la condizione indicata dalla analisi della CLE, ossia la condizione di ribaltamento semplice globale della facciata. (Figura 6-6)

COMPARTO A - CLE

COMPARTO A	UNITA' STRUTTURALE	01A	05A	08A	09A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	17A	18A	19A	20A
	INTERFERENZA	si	si	no	no	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

COMPARTO B - CLE

COMPARTO B	UNITA' STRUTTURALE	01B	02B	03B	04B	05B	06B	07B	08B	09B	10B	11B	12B	13B	14B	15B
	INTERFERENZA	no	no	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

Figura 6-6 Visualizzazione dell'interferenza con la metodologia proposta dalla CLE

Nel caso particolare sono stati riscontrati 25 unità strutturali che ricadono nella definizione di edificio interferente. In particolare 12 edifici facenti parte del Comparto A e 13 edifici del Comparto B. Tale condizione è stata rappresentata in maniera intuitiva attraverso la colorazione degli edifici interferenti (secondo la carta degli elementi per l'analisi della CLE) e il ribaltamento in pianta della facciata delle unità strutturali interferenti (impronta di interferenza). In questo modo è semplice visualizzare la condizione di interferenza.

La metodologia proposta nel lavoro di ricerca può essere considerata uno strumento più raffinato alla definizione della condizione di interferenza rispetto all'analisi della CLE. In particolare il primo livello di tipo qualitativo, che si basa sull'individuazione del più probabile cinematismo di collasso tra tutti i possibili descritti in letteratura, offre una vasta gamma di meccanismi attivabili e non considera il solo ribaltamento

semplice globale come avviene per la CLE. Per questo motivo, applicando la metodologia e l'algoritmo ad ogni unità strutturale che compone l'aggregato strutturale di Borgo San Rocco è stato possibile individuare il più probabile cinematismo di collasso sintetizzati nella tabella seguente in cui si osserva:

- il più probabile cinematismo di collasso di ogni US;
- la lunghezza dell'ingombro al suolo della porzione di edificio soggetta al cinematismo ottenuta dalla simulazione di collasso tramite l'utilizzo dell'algoritmo di calcolo;
- la lunghezza dell'ingombro al suolo valutando l'interferenza con il metodo dell'analisi della CLE considerando il ribaltamento globale della facciata.

COMPARTO A			
ID	MECCANISMO DI COLLASSO	LUNGHEZZA DI INGOMBRO AL SUOLO [m]	LUNGHEZZA DI INTERFERENZA DA CLE [m]
01A	F	3,83	11,50
05A	D	9,70	9,70
08A	D	6,40	6,40
09A	D	8,40	8,40
10A	B	2,13	6,40
11A	B	2,98	11,90
12A	F	3,25	13,00
13A	F	3,38	13,50
14A	F	7,50	15,00
15A	B	3,13	12,50
16A	D	12,50	12,50
17A	B	3,23	12,90
18A	F	3,30	9,90
19A	B	3,38	13,50
20A	F	3,30	6,60

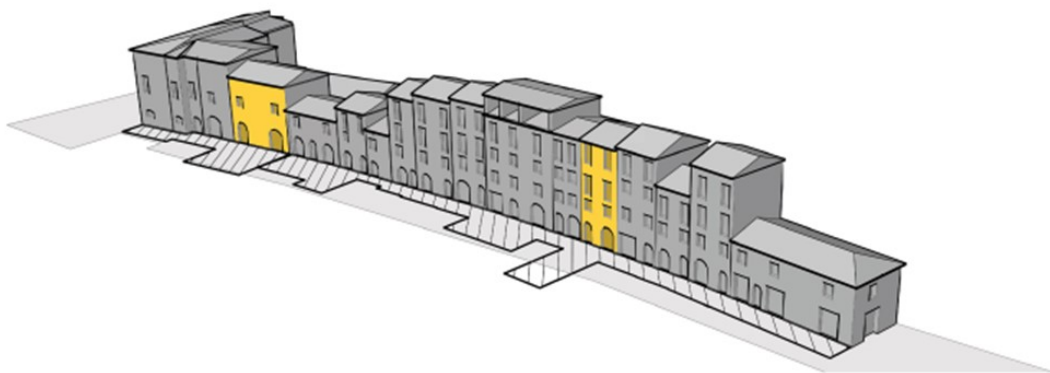
COMPARTO B			
ID	MECCANISMO DI COLLASSO	LUNGHEZZA DI INGOMBRO AL SUOLO [m]	LUNGHEZZA DI INTERFERENZA DA CLE [m]
01B	D	9,50	9,50
02B	B	3,00	12,00
03B	B	3,00	9,00
04B	B	3,50	10,50
05B	A	16,00	16,00
06B	D	9,00	9,00
07B	B	3,25	13,00
08B	B	3,25	13,00
09B	B	3,25	13,00
10B	A	10,00	10,00
11B	B	4,33	13,00
12B	B	4,00	8,00
13B	F	3,38	13,50
14B	D	10,40	10,40
15B	A	13,40	13,40

Figura 6-7 Confronto dei risultati tra il metodo CLE e l'algoritmo

Si osserva chiaramente la differenza di lunghezza di ingombro al suolo per la maggior parte delle unità strutturali che costituiscono Borgo San Rocco. Questa

considerazione fa sì che il numero di edifici interferenti con l’infrastruttura di connessione calcolato con l’algoritmo di calcolo sia minore del numero di edifici interferenti valutati con l’applicazione del metodo di analisi della CLE. Tale risultato è visualizzabile in forma grafica e da una indicazione evidente su quelli che effettivamente sono gli edifici che rendono il borgo interferente con l’infrastruttura di interconnessione e portano alla crisi dell’intero sistema di gestione dell’emergenza (Figura 6-8).

COMPARTO A - ALGORITMO



COMPARTO A	UNITA' STRUTTURALE	01A	05A	08A	09A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	17A	18A	19A	20A
	INTERFERENZA	no	si	no	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no	no

COMPARTO B - ALGORITMO



COMPARTO B	UNITA' STRUTTURALE	01B	02B	03B	04B	05B	06B	07B	08B	09B	10B	11B	12B	13B	14B	15B
	INTERFERENZA	no	no	no	no	si	si	no	no	no	no	no	no	no	si	si

Figura 6-8 Visualizzazione dell’interferenza con la metodologia proposta dall’algoritmo

L’applicazione dimostra come, proprio sul Borgo San Rocco, l’analisi della CLE sia troppo vincolata all’unico tipo di collasso considerato che può verificarsi in una struttura e come in alcune situazioni l’interferenza legata a tale meccanismo sia di fatto poco probabile. Avere uno strumento in grado di simulare in maniera più precisa la condizione di interferenza permette ai tecnici, agli Enti come Comuni, Province e

Regioni e alle Amministrazioni territoriali, di definire le priorità di intervento strutturale da applicare agli edifici per la riduzione della vulnerabilità in ottica di gestione preventiva dell'emergenza sismica.

6.3 L'integrazione della metodologia con i database nazionali sugli edifici esistenti

Negli ultimi anni si stanno diffondendo sempre più metodi e procedure di rilievo speditive per l'archiviazione e la conoscenza del tessuto urbano italiano. La finalità è quella di creare dei database informatici utili alla conoscenza delle caratteristiche architettoniche e strutturali che contraddistinguono il patrimonio edilizio della nostra nazione. Basti pensare ad esempio alle metodologie proposte dal GNDT (Gruppo Nazionale di Difesa del Territorio), le quali hanno portato sicuramente una innovazione e una conoscenza del tessuto edilizio dettagliato attraverso le schede AeDES (Baggio et al., 2000). Recentemente è stato introdotto un nuovo progetto denominato CARTIS. Acronimo di CARatterizzazione Tipologico-Strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari, è un progetto la cui finalità è legata alla necessità di avere maggiore conoscenza sull'edificato nazionale per la valutazione della vulnerabilità sismica. Nasce nell'ambito del Progetto triennale ReLUIS 2014-2016, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC) (Zuccaro et al., 2015). Il progetto si basa prevalentemente sulla compilazione delle schede. Queste ultime hanno come finalità quella di individuare le tipologie edilizie caratteristiche di un territorio comunale, in particolare comuni caratterizzati da omogeneità del tessuto edilizio per età di primo impianto e/o tecniche costruttive. Oggetto di studio sono gli edifici ordinari, ovvero edifici ad uso abitativo e/o servizi, costruiti in muratura o cemento armato. Sono invece esclusi gli edifici strategici, strutture speciali e beni monumentali. L'intento è quello di avere una conoscenza più dettagliata dell'edificato nazionale, individuando caratteristiche costruttive locali, e tenendo conto che l'evoluzione delle tecniche costruttive ha inciso notevolmente sulle caratteristiche e qualità di costruzione determinando differenze anche nella risposta sismica. Le Schede CARTIS, infatti, sono in grado di fornire una serie di informazioni dettagliate, per mezzo delle quali si può effettuare uno studio della vulnerabilità sismica degli edifici costituenti la zona di studio. Una volta rielaborati i dati raccolti e avendo una visione specifica e puntuale del costruito nazionale risulta possibile una regionalizzazione delle funzioni di vulnerabilità sismica attualmente impiegate in modo indifferenziato su tutto il territorio nazionale (Zuccaro et al., 2015).

Le schede CARTIS sono di due tipologie: scheda CARTIS di I livello e scheda CARTIS di II livello. La scheda CARTIS di I livello riguarda la caratterizzazione di una tipologia presente nel comparto (un'area omogenea che si caratterizza per la presenza al suo interno di edifici omogenei dal punto di vista tipologico strutturale e per età di costruzione): viene dunque compilata per ogni tipologia individuata che risulti significativa per lo stesso. La scheda CARTIS di II livello identifica invece il singolo edificio, risulta dunque specifica e dettagliata, ma nei contenuti non si discosta molto dalla scheda di I livello. Sia la scheda di I livello che quella di II livello sono formate da 4 sezioni:

- SEZIONE 0: permette l'identificazione del Comune e dei Comparti in esso individuati.
- SEZIONE 1: permette l'identificazione della tipologia strutturale prevalente all'interno del singolo comparto nel caso delle schede di I livello; per le schede di II livello permette invece l'identificazione dell'edificio.
- SEZIONE 2: permette di definire le caratteristiche generali della tipologia strutturale in esame nel caso delle schede di primo livello; nelle le schede di II livello permette invece di definire le caratteristiche generali dell'edificio come ad esempio il numero di piani e l'uso prevalente.
- SEZIONE 3: permette la caratterizzazione degli elementi strutturali della tipologia in esame nel caso della scheda di I livello; nella scheda di II livello permette la caratterizzazione tipologica della struttura (Muratura o cemento armato e elementi non strutturali vulnerabili).

Secondo il Manuale per la compilazione delle schede CARTIS, la procedura di rilievo è di tipo speditiva a vista realizzata nello specifico attraverso la consultazione di materiali di archivio, ove disponibili, ma soprattutto attraverso l'intervista a tecnici locali che hanno esercitato e che esercitano la professione nel comune investigato. Per tale motivo l'affidabilità delle informazioni è medio-bassa.

Nell'ambito della ricerca è sorta la necessità di pensare di integrare il database CARTIS, così come è strutturato, ed utilizzarlo come strumento di supporto per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura come proposto in questo elaborato. Nello specifico la possibilità di utilizzare i dati contenuti nella scheda CARTIS edificio (II livello) come dati di input per l'applicazione dell'algoritmo Saccucci-Grande con lo scopo di identificare il più probabile cinematismo di collasso degli edifici in muratura.

Eseguendo una analisi dettagliata degli elementi costituenti la scheda CARTIS edificio è possibile osservare che nella sezione 3.1 A denominata "Caratterizzazione

tipologica MURATURA e STRUTTURE MISTE” vi è una sezione relativa alla definizione degli elementi di vulnerabilità per le murature (Figura 6-9)

b. Presenza muratura a Sacco <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		c. Presenza Catene o Cordoli (% nell'edificio) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %		
d. Collegamento trasversale <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		e. Presenza di Speroni/Contrafforti <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		
f. Spessore medio prevalente Pareti Piano Terra <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> cm		g. Interasse medio prevalente Pareti <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> m		
m. Ulteriori elementi di vulnerabilità per le murature		SI	NO	NON SO
1	Mancanza di ammorsamenti tra pareti ortogonali.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Presenza di cordoli in breccia su murature a doppio paramento.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Presenza di architravi con ridotta rigidità flessionale o con inadeguata lunghezza di appoggio.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Presenza di archi ribassati e/o piattabande con imposte inadeguate.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Riduzioni localizzate della sezione muraria (presenza di canne fumarie, cavedi, nicchie, etc.).	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Discontinuità localizzate (chiusura vecchie aperture, sarciture mal realizzate, etc.).	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Presenza di pilastri isolati.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Aperture in prossimità degli angoli del fabbricato.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Presenza di pareti in muratura ad una testa, molto caricate e di snellezza inadeguata a carichi verticali.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Sopraelevazioni in muratura su muratura esistente.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Elevata percentuale di aperture di vani al piano terra.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Presenza di struttura di copertura rigida e mal collegata.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Presenza di travi di colmo di notevoli dimensioni mal collegate.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Orizzontamenti di qualsiasi tipo mal collegati alle pareti.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Mancanza di connessione della parete alla copertura.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Fondazione inadeguata a sostenere l'incremento di carico verticale dovuto al sisma.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Presenza di grotte o cavità al di sotto del solaio di piano terra.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Irregolarità della forometria rispetto alla scatola muraria esterna.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Presenza di piccoli corpi aggiunti di differente rigidità e/o con collegamenti localizzati.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	Presenza di piani sfalsati anche rispetto ad edifici contigui nell'aggregato.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 6-9 Stralcio della scheda CARTIS edificio

Come già ampiamente descritto nei capitoli precedenti, l'algoritmo si basa proprio sulla valutazione di determinate caratteristiche strutturali che fanno sì che un meccanismo di collasso fuori piano possa attivarsi. Tra queste:

- Snellezza della facciata
- Ammorsamento degli impalcati
- Cordolo in sommità
- Ammorsamento delle pareti ortogonali
- Catene o tiranti
- Allineamento delle bucatore
- Discontinuità delle sezioni murarie
- Luce elevata tra le pareti perpendicolari alla facciata
- Presenza del timpano in facciata

Tali informazioni, come evidenziato nella Figura 6-10, possono dedotte dalla consultazione della scheda edificio. In particolare nella sezione c., g., m.1, m.6, m.15, m.16, m.19. Mancano però alcune informazioni, come ad esempio quella relativa alla

presenza del timpano in facciata, che comunque può essere dedotta dalla consultazione della parte generale della scheda in cui sono inserite le fotografie esterne dell'edificio.

presenza di dati utili nella scheda edificio

b. Presenza muratura a Sacco <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		c. Presenza Catene o Cordoli (% nell'edificio) <input type="text"/> %		
d. Collegamento trasversale <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		e. Presenza di Speroni/Contrafforti <input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NON SO		
f. Spessore medio prevalente Pareti Piano Terra <input type="text"/> cm		g. Interasse medio prevalente Pareti <input type="text"/> m		
m. Ulteriori elementi di vulnerabilità per le murature		SI	NO	NON SO
1	Mancanza di ammassamenti tra pareti ortogonali.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Presenza di cordoli in breccia su murature a doppio paramento.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Presenza di architravi con ridotta rigidezza flessionale o con inadeguata lunghezza di appoggio.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Presenza di archi ribassati e/o piattabande con imposte inadeguate.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Riduzioni localizzate della sezione muraria (presenza di canne fumarie, cavedi, nicchie, etc.).	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Discontinuità localizzate (chiusura vecchie aperture, sarciture mal realizzate, etc.).	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Presenza di pilastri isolati.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Aperture in prossimità degli angoli del fabbricato.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Presenza di pareti in muratura ad una testa, molto caricate e di snellezza inadeguata a carichi verticali.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Sopraelevazioni in muratura su muratura esistente.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Elevata percentuale di aperture di vani al piano terra.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Presenza di struttura di copertura rigida e mal collegata.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Presenza di travi di colmo di notevoli dimensioni mal collegate.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Orizzontamenti di qualsiasi tipo mal collegati alle pareti.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Mancanza di connessione della parete alla copertura.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Fondazione inadeguata a sostenere l'incremento di carico verticale dovuto al sisma.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Presenza di grotte o cavità al di sotto del solaio di piano terra.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Irregolarità della forometria rispetto alla scatola muraria esterna.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Presenza di piccoli corpi aggiunti di differente rigidezza e/o con collegamenti localizzati.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	Presenza di piani sfalsati anche rispetto ad edifici contigui nell'aggregato.	<input type="checkbox"/> <input type="text"/> %	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 6-10 Elementi presenti nella scheda CARTIS edificio per il funzionamento dell'algoritmo

Avendo quindi constatato la possibilità di utilizzare le schede CARTIS edificio di II livello, che costituiscono un dataset di informazioni utile alla compilazione dei dati di input per l'applicazione dell'algoritmo e quindi per la definizione dei meccanismi di crollo fuori piano, è possibile concludere che la metodologia proposta nella ricerca offre la possibilità di interfacciarsi con i database sviluppati a livello nazionale per la definizione della vulnerabilità sismica degli edifici di tipo qualitativa con riferimento ai meccanismi locali fuori piano (Figura 6-11). Tali database, essendo per loro natura estremamente dinamici poiché è possibile ampliarli con i dati di rilievo dell'intero edificato nazionale e interrogabili per mezzo di query in linguaggio SQL, costituiscono quindi un ottimo strumento di supporto alla metodologia proposta e al funzionamento dell'algoritmo Saccucci-Grande.

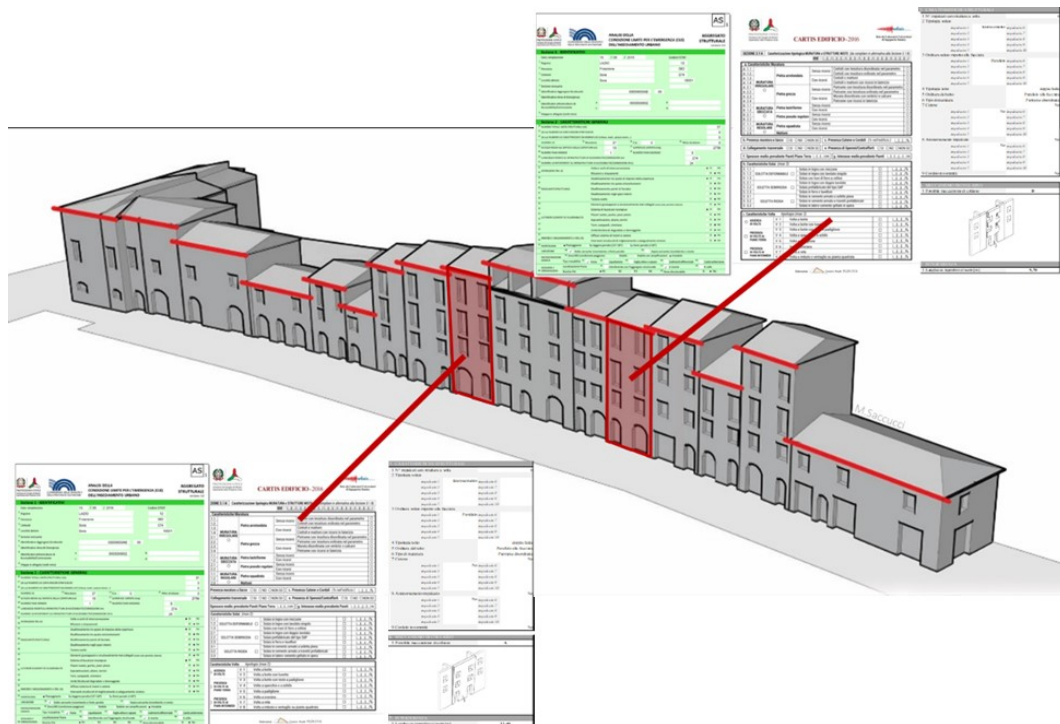


Figura 6-11 Database e schede informative associate alle US di Borgo San Rocco

6.4 Bibliografia

- Dolce, F., Brammerini, F., Castenetto, S., & Naso, G. (2014). Strategie di mitigazione del rischio sismico: progetto standard e indicatore di resilienza ai terremoti degli insediamenti. Atti del 33 Convegno GNGTS, 371-80.
- Commissione Tecnica per la microzonazione sismica (2014), Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano, Roma.
- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., & Corazza, L. (2000). Manuale per la compilazione della scheda di 1 livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES). Servizio sismico Nazionale e Gruppo Nazionale per la difesa dai Terremoti, 112.
- Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., & Moroni, C. (2015). La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico. Proceedings of the GNGTS.

CONCLUSIONI

Gli eventi sismici degli ultimi anni hanno posto l'attenzione su una parte consistente del patrimonio edilizio italiano, i centri storici, monumenti frutto di stratificazioni edilizie che si sono susseguite negli anni e che li hanno trasformati in aggregati strutturali complessi rappresentativi dell'identità storica e culturale del nostro paese. La maggior parte di essi presentano un'elevata vulnerabilità dovuta al degrado naturale per l'incuria dell'uomo nel corso dei decenni, alla loro ubicazione poiché in genere si trovano in zone ad elevata pericolosità sismica e alla loro conformazione architettonica risultato di incisive trasformazioni subite negli anni per adeguarli alle nuove esigenze abitative. È chiaro che tali centri storici richiedono un intervento di mitigazione del rischio per preservarli in modo da trasmettere alle generazioni future il *genius loci*.

Se si pensa, inoltre, che la maggior parte di essi sono ancora abitati e che in determinati periodi dell'anno anche densamente popolati da turisti, diventa fondamentale identificare un sistema che permetta di agire sul costruito innanzitutto per la salvaguardia delle vite umane e successivamente per la salvaguardia del patrimonio culturale.

Attualmente i sistemi previsti dalla normativa vigente e dalla letteratura scientifica per l'analisi degli edifici esistenti prevede l'individuazione della vulnerabilità per mezzo di strumenti di difficile gestione ed applicazione. A causa della variabilità dei dati raccolti le analisi diventano complesse comportando dei costi che in alcuni casi possono divenire insostenibili. Se si pensa che la normativa vigente prevede che gli edifici vengano analizzati strutturalmente valutando sia meccanismi di collasso globali che locali in cui, per quest'ultimi, bisogna tener conto di tutte le caratteristiche dell'edificio, è evidente che una analisi di questo tipo possa risultare onerosa in termini di tempo ed affidabilità del risultato. Individuare il più probabile cinematico di collasso locale può rappresentare un vantaggio in quanto riduce il numero di variabili che entrano in gioco per l'analisi della vulnerabilità della struttura.

Fatte queste premesse l'attività di ricerca ha:

- analizzato lo stato dell'arte sulle tecniche di rilievo, modellazione parametrica ed analisi strutturali di edifici in muratura finalizzate allo studio della

vulnerabilità sismica. L'analisi ha definito gli obiettivi principali dell'attività di ricerca che riguardano la realizzazione di uno strumento applicativo, basato sullo sviluppo di una metodologia di rilievo a differenti livelli di conoscenza del tessuto edilizio urbano, per la progettazione di modelli di calcolo numerico in grado di prevedere il comportamento sismico delle strutture in muratura;

- ha eseguito uno studio sulla consistenza dei centri storici minori in Italia, dove per definizione un centro storico minore è un comune che raggiunge al massimo 5000 abitanti. Con questi presupposti sono stati acquisiti dati dai portali ISTAT, dai siti delle regioni, province e comuni oltre alle cartografie tecniche di base come le mappe sulla pericolosità sismica fornite dall'INGV. Il supporto per la gestione di questi dati è stato un sistema GIS open source (QGIS);
- ha sviluppato una procedura multilivello per l'analisi degli edifici in muratura che costituiscono i centri storici definendo gli strumenti applicativi da utilizzare per eseguire il rilievo (da tecniche speditive a strumenti tecnologici ed innovativi), l'elaborazione/archiviazione dei dati (da CAD a BIM) e l'analisi strutturale (da modelli semplificati a modelli numerici) secondo un approccio di tipo qualitativo e quantitativo;
- ha testato la procedura metodologica su un caso di studio reale: il Borgo San Rocco di Sora (FR). Si tratta di un aggregato strutturale in muratura con una conformazione di tipo street canyon che ha permesso la sperimentazione e l'ottimizzazione della metodologia;
- infine ha individuato alcune delle possibili applicazioni della metodologia come ad esempio per la stesura dei Piani di Protezione Civile e l'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza. La procedura sperimentata è di supporto agli enti di amministrazione territoriale (comunale, provinciale, regionale, statale) per la gestione e la conoscenza del patrimonio edilizio. In particolare permette una migliore azione di conservazione e monitoraggio degli edifici che rappresentano il patrimonio artistico-culturale italiano;

CONCLUSIONI

- ha valutato la possibilità di integrazione della metodologia con i database nazionali sul costruito esistente, come ad esempio il database CARTIS.

In conclusione la metodologia progettata nel corso dell'attività di ricerca può migliorare le procedure esistenti e può fornire uno strumento applicativo nella gestione della mitigazione del rischio a tutti i soggetti interessati, pubblici e privati.

BIBLIOGRAFIA

- “Convenzione Europea del Paesaggio” (2000). In Congresso dei poteri locali e regionali del Consiglio d’Europa, Firenze, Vol. 20.
- “NTC.” (2018) Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" D. M. 17 gennaio 2018.
- “OPCM n. 3274.” Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. G.U. 8 maggio 2003, n. 105 - S.O. n. 72, 20 Marzo 2003.
- “OPCM n. 3431.” Ulteriori modifiche ed integrazioni all'O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica». G.U. 10 maggio 2005, n. 107 - S.O. n. 85, 3 Maggio 2005.
- Albarello, D., Azzaro, R., Barbano, M. S., D'Amico, S., D'Amico, V., Rotondi, R., ... & Zonno, G. (2007). Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito.
- Aveta, A. (2001). *Tutela, restauro, gestione dei beni architettonici e ambientali*. CUEN.
- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., & Corazza, L. (2000). Manuale per la compilazione della scheda di 1 livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell’emergenza post-sismica (AeDES). Servizio sismico Nazionale e Gruppo Nazionale per la difesa dai Terremoti, 112.
- Bartolomucci, C., & Donatelli, A. (2012). La conservazione nei centri storici minori abruzzesi colpiti dal sisma del 2009: esigenze di riuso e questioni di conservazione. In *Scienza e beni culturali XXVIII* (Vol. 28, pp. 101-111). Edizioni Arcadia Ricerche.
- Bartolucci, D. (2009). *Principi di laser scanning 3D*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Bellicini, L. (2012). *I Rapporto ANCE/CRESME. Lo stato del territorio italiano 2012. Insediamento e rischio sismico e idrogeologico*.

- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni* 18, 66-74.
- Beolchini, Giovanni C., et al. Sisma del 1997 nella Regione Marche: repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Rapporto di ricerca, Regione Marche, CNR-ITC, Università degli Studi dell'Aquila, Osimo (AN): Tipografia s.r.l. Grafiche Scarponi, 2007.
- Beranger, E. M. (1995). Un frammento altomedioevale da San Domenico di Sora.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Parodi, S. (2007). Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98.
- Bettini, M. C., & Nicosia, A. (Eds.). (2011). *Le mura megalitiche: il Lazio meridionale tra storia e mito*. Gangemi Editore spa.
- Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Piemonte, A., Ruschi, P., & Tenchini, L. (2017). 3D SURVEY TECHNIQUES FOR THE ARCHITECTURAL RESTORATION: THE CASE OF ST. AGATA IN PISA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Bianchini, M. (2008). *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*. Aracne.
- Biddittu, I., Cassoli, P., & Malpieri, L. (1967). Stazione musteriana in Valle Radice nel comune di Sora (Frosinone). *Quaternaria*, 9, 321-348.
- Bini, M., & Bertocci, S. (2012). *Manuale di rilievo architettonico e urbano*. Novara, Italia: Città Studi Edizioni.
- Bolognesi, M. (2016). *La fotogrammetria digitale e la computer vision per l'ingegneria civile: teoria e casi studio*.
- Borri, A., Corradi, M., Castori, G., & De Maria, A. (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2647-2665.
- Bradaschia, M. (1996). *Memoria piano progetto: architettura e tecniche per i centri storici: proposte e soluzioni a Trieste*. Laterza.
- Braga, F., Dolce, M., & Liberatore, D. (1982, September). A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. In *Proceedings of the seventh European conference on earthquake engineering*, Athens, Greece (pp. 431-450).
- Branca, C. (1847). *Memorie storiche della città di Sora (Vol. 46)*. Forni.

- Brusaporci, S. (2010). Sperimentazione di modelli tridimensionali nello studio dell'architettura storica.
- Brusaporci, S., Maiezza, P., & Tata, A. (2018). A FRAMEWORK FOR ARCHITECTURAL HERITAGE HBIM SEMANTIZATION AND DEVELOPMENT. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).
- Caniggia, G., & Maffei, G. L. (2008). *Lettura dell'edilizia di base* (Vol. 215). Alinea Editrice.
- Carci, P. (1980). *I centri storici minori*. DiPiTer-Università della Calabria.
- Cervellati, P. L., & Scannavini, R. (1973). Bologna: politica e metodologia del restauro nei centri storici.
- Ciardini, F., & Falini, P. (1978). *Politica urbanistica e programmi di intervento pubblico: Bergamo, Bologna, Brescia, Como, Gubbio, Pesaro, Vicenza. I centri storici*.
- Circolare NTC 2018. Circolare n. 7 del 21 Gennaio 2019, "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al DM 17 gennaio 2018". C.S.LL.PP, 2019.
- Commissione Tecnica per la microzonazione sismica (2014), *Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano*, Roma.
- Coppola, A., D'Angelo, G., & Spina, M. (2004). *La legislazione dei beni culturali e del paesaggio*. Edizioni giuridiche Simone.
- Corradi, E., & Gritti, A. (2018). Il patrimonio delle comunità resilienti. Mappe e codici nell'Italia dei terremoti. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 15.
- D'ayala, D., & Speranza, E. (2002). An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings. *disp*, 3(1), 3-3.
- D'Ayala, D., & Speranza, E. (2004, January). Un criterio per la formulazione e la calibrazione di curve di fragilità e scenari di danno: il caso di Nocera Umbra (PG). In 9th National Conference "L'Ingegneria Sismica in Italia", Relazioni su invito e memorie in CD-ROM, Memoria B3-D2.
- D'Alessio, A. (2007). L'avancorpo dell'acropoli di Ferentino. Vecchi e nuovi dati per la lettura storica del monumento. In *Archeologia classica* (p. 397-433).
- D'Alessio, G. (1983). *I centri storici: aspetti giuridici*. Giuffrè.
- Delfino, F. (1976). Osservazioni sul problema dei centri storici. *Riv. giur. edilizia*.
- Delladio, A. (2011). Monitoraggio sismico del territorio nazionale. *INGV*, 11.

- Di Gioia, V. (1975). Criteri di definizione dei centri storici. *Civiltà delle Macchine*.
- Di Stefano, R. (1979). *Il recupero dei valori: centri storici e monumenti: limiti della conservazione e del restauro*. Ed. Scientifiche Italiane.
- Docci, M., & Maestri, D. (1984). Il rilevamento architettonico: storia, metodi e disegno. Laterza.
- Dolce, F., Brammerini, F., Castenetto, S., & Naso, G. (2014). Strategie di mitigazione del rischio sismico: progetto standard e indicatore di resilienza ai terremoti degli insediamenti. Atti del 33 Convegno GNGTS, 371-80.
- Dolce, M., 1991. Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche. *L'Industria delle costruzioni* 25, 44-57.
- Dolce, M., Masi, A., Samela, C., Santarsiero, G., Vona, M., Zuccaro, G., Cacace, F., Papa, F., 2004. Esame delle caratteristiche tipologiche e del danneggiamento del patrimonio edilizio di San Giuliano di Puglia, in: XI Congresso Nazionale 'L'ingegneria Sismica in Italia', pp. 25-29.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J. A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3), 21-29.
- Fabietti, W. (Ed.). (1999). *Vulnerabilità sismica e trasformazione dello spazio urbano* (Vol. 8). Alinea Editrice.
- Fai, S., & Rafeiro, J. (2014). Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information model (BIM)-West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 123.
- Fava, M., Munari, M., da Porto, F., & Modena, C. (2015). Valutazione della vulnerabilità sismica locale di edifici esistenti in muratura attraverso analisi cinematica dei meccanismi di collasso e curve di fragilità. XVI Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", L'Aquila, Italy.
- Fedele, Francesco (1988). Giustiniano Nicolucci e la fondazione dell'antropologia in Italia. Alle origini dell'antropologia italiana: Giustiniano Nicolucci e il suo tempo, 37-60.
- Ferrante, F., & Berardi, E. (2007). Metadati per il catalogo del patrimonio archeologico, architettonico, storico artistico ed etnoantropologico, il progetto Cultura online e CulturaItalia.

- Formisano, A. (2017). Local-and global-scale seismic analyses of historical masonry compounds in San Pio delle Camere (L'Aquila, Italy). *Natural Hazards*, 86(2), 465-487.
- Formisano, A. (2017). Theoretical and numerical seismic analysis of masonry building aggregates: case studies in San Pio Delle Camere (L'Aquila, Italy). *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), 227-245.
- Formisano, A., Marzo, A., & Indirli, M. (2013). Analisi comparativa tra metodi di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici murari di Arsita (TE). Proc. XV Convegno ANIDIS (Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica).
- Franceschini, F. (1967). *Per la salvezza dei beni culturali in Italia: atti e documenti della Commissione d'indagine per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico, archeologico, artistico e del paesaggio*. Casa ed. Colombo.
- Francini, M., Colucci, M., Palermo, A., & Viapiana, M. F. (2012). I centri storici minori. Strategie di rigenerazione funzionale: Strategie di rigenerazione funzionale. FrancoAngeli.
- Galli, P. A. C., & Naso, J. A. (2009). Unmasking the 1349 earthquake source (southern Italy): paleoseismological and archaeoseismological indications from the Aquae Iuliae fault. *Journal of Structural Geology*, 31(2), 128-149.
- GENS, R., & VAN GENDEREN, J. L. (1996). Review Article SAR interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1803-1835.
- Gisotti, G., & Benedini, M. (2000). Il dissesto idrogeologico: previsione, prevenzione e mitigazione del rischio. Rome, Italy: Carocci.
- Giuffré, A. Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia. Bari: Laterza, 1993.
- GNDT, 1993. Rischio sismico di edifici pubblici, Parte I: aspetti metodologici, in: Proceedings of CNR Gruppo Nazionale Difesa Terremoti, Roma, Italia.
- Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998. European Seismological Commission (ESC).
- Guagenti, E., Petrini, V., 1989. Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità, in: Proceedings of the 4th Italian National Conference on Earthquake Engineering, pp. 145-153.
- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55-69.

- Guidi, G., Russo, M., Magrassi, G., & Bordegoni, M. (2010). Performance evaluation of triangulation based range sensors. *Sensors*, 10(8), 7192-7215.
- Gurrieri, Francesco, et al. Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post sismica degli edifici - Regione Umbria. Edited by Francesco Gurrieri. Roma: Edizioni DEI tipografia del Genio Civile, 1999.
- Heyman, J. (1966). The stone skeleton. *International Journal of solids and structures*, 2(2), 249-279.
- Lagomarsino, S., Cattari, S., 2015. Perpetuate guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, 13-47.
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S., 2013. TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures* 56, 1787-1799.
- Lauri A. (1933) "Note illustrative sulla città di Sora", Sora.
- Lauri. A. (1914) Sora, Isola Liri e dintorni, I ediz. Sora, D'Amico; II ediz.
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S. (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in construction*, 20(5), 601-609.
- Lenza, P., Ghersi, A., & Calderoni, B. (2011). Edifici in muratura. Dario Flaccovio.
- Leonardi, S. (2010). La Valle del Liri: da Terra di Lavoro a distretto industriale. In *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA*, Brescia.
- Locati, M., CAMASSI, R. D., Rovida, A. N., Ercolani, E., BERNARDINI, F. M. A., Castelli, V., ... & D'Amico, S. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database.
- Lucantoni, A., Bosi, V., Brammerini, F., De Marco, R., Lo Presti, T., Naso, G., & Sabetta, F. (2001). Il rischio sismico in Italia. *Ingegneria Sismica*, 1(2001), 5-36.
- Maietti, F. (2008). Centri Storici Minori-Progetti di recupero e restauro del tessuto urbano fra identità culturale e salvaguardia. Maggioli Editore.
- Manieri, E. (1978). Il problema dei centri storici minori del Mezzogiorno "interno. *I centri storici, Milano, G. Mazzotta*, 73-78.
- Marchetti, A., Nardi, A., Margheriti, L., Latorre, D., Ciaccio, M. G., Lombardi, A. M., ... & Battelli, P. (2019). RAPPORTO BOLLETTINO SISMICO ITALIANO sulla revisione della sequenza sismica del centro Italia 24 agosto 2016-31 agosto 2018.

REFERENCES

- Martini, A. (1982). Industria della carta e proletariato di fabbrica a Isola del Liri nel sec. XIX. *Studi Romani*, 30(2), 196.
- Mazzotti, C., Savoia, M., Chinni, C., Perri, G., 2013. Una metodologia speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici in muratura e calcestruzzo armato. *Progettazione Sismica 2*.
- Mele, F., Arcoraci, L., Battelli, P., Berardi, M., Castellano, C., Lozzi, G., ... & Rossi, A. (2010). *Bollettino sismico italiano 2008*. Quaderni di Geofisica.
- Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. (2008). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni (2008)(accessed: 21 February 2012).
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., 2004. The european RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios, in: *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Munari, M. (2010). Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura.
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311-327.
- NorMal, R. 1/88, Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico, CNR-ICR, Roma 1990.
- Pacichelli G.B. (1703) “ Il regno di Napoli in dodici province”, Napoli.
- Pane, R. (1965). Centro storico e centro antico. *Napoli Nobilissima IV*.
- Paris, L. (2012). *Fotogrammetria e/o fotomodellazione*.
- Paris, L., & Paris, L. (2010). Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura.
- Pavan, A., & Mirarchi, C. La nuova norma UNI 11337, gestione digitale delle costruzioni.
- Pavan, A., Mirarchi, C., & Giani, M. (2017). BIM: metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell'era digitale. *Tecniche Nuove*.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017), "An integrated modeling system (BIM) for a quickly and reliable evaluation of the "interference" for the historical building aggregates: Limit Emergency Condition (CLE)", in 39° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione - Territori e frontiere della rappresentazione, GANGEMI EDITORE, Napoli.

- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017). *HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers* (Vol. 10). Aquila: DISEGNARECON.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E. (2017). HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers. *DISEGNARECON*, 10(18), 5-1.
- Peppoloni, S. (2014). *Convivere con i rischi naturali*. Società editrice Il Mulino, Bologna.
- Pera, F., Pesce, P., Bevilacqua, M., Setti, P., & Menini, M. (2016). Analysis of different impression techniques and materials on multiple implants through 3-dimensional laser scanner. *Implant dentistry*, 25(2), 232-237.
- Piermattei, L., Carturan, L., & Guarnieri, A. (2015). Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(13), 1791-1802.
- Pirotti, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2013). State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 66-78.
- Polese, M., 2002. *Un approccio a doppio livello per la valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in ca*. Ph.D. thesis.
- Portoghesi, P. (1968). *Dizionario enciclopedico di architettura e urbanistica*. Ist. editoriale romano.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 21(115), 269-291.
- Remondino, Fabio. "Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse." *DISEGNARECON* 4, no. 8 (2011): 90-98.
- Rizzolatti, P. (2016). Il terremoto nel mondo di Leonardo Zanier. *Oltreoceano*, 12, 59-72.
- Rolli, G. L. (2008). *Salvare i centri storici minori. Proposte per un atlante urbanistico dei centri d'Abruzzo* (Vol. 3). Alinea Editrice.
- Sabetta, F., & Paciello, A. (1995). *Valutazione della pericolosità sismica. La Geologia di Roma. Il Centro Storico. Mem. descrittive della CG d'It*, 50-443.
- Saccucci, M., Cima, V., Grande, E., Imbimbo, M., & Pelliccio, A. (2019). *Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia). Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia)*, 152-162.
- Sacks, R., Kaner, I., Eastman, C. M., & Jeong, Y. S. (2010). The Rosewood experiment—Building information modeling and interoperability for architectural precast facades. *Automation in Construction*, 19(4), 419-432.

- Santangelo, M. (2017). *Le cartiere di Isola del Liri: storia e valorizzazione di un patrimonio di archeologia industriale* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- Stucchi, M., Camassi, R., Rovida, A., Locati, M., Ercolani, E., Meletti, C., ... & Azzaro, R. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. *Quaderni di Geofisica*.
- Valluzzi, M. R., Munari, M., Modena, C., Cardani, G., & Binda, L. (2007, June). *Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia*. In 12 Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia (pp. 10-14).
- Vianello, D. (1988). *Metodologia di analisi e progetto per i centri storici minori*.
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in construction*, 38, 109-127.
- Zuccaro, G., 2004. *SAVE - Strumenti aggiornati per la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio e dei sistemi urbani. Tema 1: Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio-economiche*. Napoli.
- Zuccaro, G., 2011. *Strategie di riduzione del rischio a medio termine su scala regionale*. Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIST) Università di Napoli Federico II, workshop di coordinamento nuovo progetto ReLUIIS.
- Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., & Moroni, C. (2015). *La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico*. Proceedings of the GNGTS.